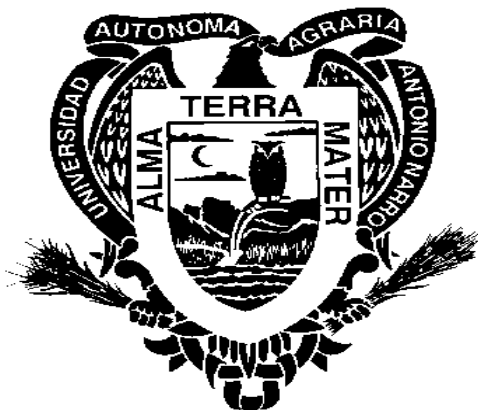


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**Evaluación de la evapotranspiración de referencia con datos
promedio a diferentes intervalos de tiempo**

**POR:
Delfino Vázquez Gutiérrez**

**TESIS
Presentada Como Requisito Parcial
Para Obtener el Título de:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Abril de 2012**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Evaluación de la evapotranspiración de referencia con datos
promedio a diferentes intervalos de tiempo

POR:
Delfino Vázquez Gutiérrez

TESIS

Que somete a consideración del H. Jurado Examinador
como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA

El presidente del jurado



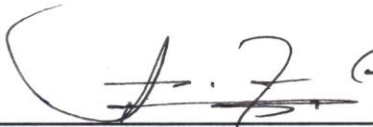
Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor principal



Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor



Dr. Juan Manuel Covarrubias Ramírez
Asesor



M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez
Coordinador de la División de Ingeniería

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Abril de 2012

Coordinación de
Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A Padre Jesús por haberme dado la oportunidad de realizar el sueño que siempre tuve y acompañarme en los momentos buenos y malos de mi vida, por mi bonita familia, de todo corazón Gracias.

A mis Padres que sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y educarme, que gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida y porque nunca podré pagar todos sus desvelos ni aun con la riqueza más grande del mundo. “por lo que soy y por todo el tiempo que les robe pensando en mí... Gracias con amor y respeto su hijo”

A mi Alma Mater por haberme cobijado durante estos cinco años y por brindarme los conocimientos para formarme como Ingeniero Agrónomo en Irrigación.

A la Empresa América Equipos Mecanizados S.A de C.V. por haberme permitido realizar ahí mi semestre de Prácticas Profesionales y brindarme todo el apoyo necesario para complementar mi formación como Ingeniero Agrónomo en Irrigación, así como a todos a todo el equipo de trabajo que lo integra por brindarme su bella amistad.

A los Maestros que participaron en mi formación como ingeniero, por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales

Al Dr. Alejandro Zermeño González por darme la oportunidad de trabajar con él, en una de sus investigaciones, por la confianza, sugerencias y disponibilidad brindada para la revisión del presente trabajo de tesis.

A mis Asesores por su apoyo en la revisión del presente trabajo.

A mis compañeros de generación CXII, por esa amistad que nos tuvimos y por ayudarnos unos a otros en aquellas materias en las que sufríamos todos con los trabajos.

DEDICATORIA

A mis padres Cruz Evencio Vázquez Cortes y Ma. Bernarda Gutiérrez Pérez por darme la vida, brindarme su apoyo y cariño, por sus consejos y la mucha paciencia que me tienen. Por esas lágrimas, producto del cariño al estar lejos de casa. Y por aguantar hasta este momento. Querido papa y mama, este logro es de ustedes y nadie se los podrá quitar.

A mis hermanas Eva, Dora, Celia, Verónica, así como a como a mi sobrinito Diego, porque juntos somos la familia más bonita y porque también ellos fueron mi inspiración para no andar en malos pasos, luchar con mucha fe y no darles un mal ejemplo como hermano mayor.

A mis abuelitas(os) Ma. Del Carmen, Guillermo (†), Ma. Cirila, Manuel (†), Arcadia, Felipe por su cariño incondicional, por su apoyo en la realización de este logro, por sus consejos que me han ayudado a ser una buena persona y por preocuparse por mí.

A mis tíos(as) por compartir momentos de alegría y tristeza con todos y cada uno de ustedes, por sus consejos y apoyo que me dieron.

A mis primos(as) por su amistad incondicional y por todos esos momentos de juego y alegría que me han permitido vivir a su lado

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
RESUMEN	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	3
HIPÓTESIS.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Proceso de Evapotranspiración (ET).....	4
2.2 Descripción de la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}).....	9
2.3 Descripción de la evapotranspiración de referencia por el método FAO- Penman Monteith.....	12
2.4 Antecedentes de la fórmula FAO Penman-Monteith.....	13
2.5 Ecuación de FAO Penman-Monteith	20
2.6 Descripción de las variables climatológicas requeridas por el método FAO- Penman-Monteith.....	23
2.7 Descripción del procedimiento que se utiliza para determinar los valores promedio diarios de las variables climatológicas requeridas por el método FAO Penman-Monteith.	26
2.8 Estudios previos donde se a utilizado la ecuación FAO-Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia.....	28
2.9 Aplicaciones de la ecuación FAO-Penman-Monteith.....	32

III. MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1 Procedencia y tratamiento previo de la información climática requerida por el método FAO Penman-Monteith.	34
3.2 Descripción de la Ecuación del método FAO Penman-Monteith	35
3.3 Procedimiento de cálculo de la ET_{ref} mediante el método FAO Penman-Monteith.	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1 Evapotranspiración de referencia mensual con datos climatológicos promedio de 12 y 24 hrs, y su relación con la Radiación neta y la Temperatura del aire.....	45
4.2 Evapotranspiración de referencia promedio mensual con datos de 12 y 24 hrs, durante el tiempo del registro.....	53
V. CONCLUSIONES	57
VI. LITERATURA CITADA	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Representación esquemática de un estoma.....	6
Figura 2.- Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual	7
Figura 3.- Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.....	9
Figura 4.- Representación simplificada de la resistencia superficial (r_s) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua (r_a).....	14
Figura 5.- Características del cultivo hipotético de referencia.....	21
Figura 6.- Promedios mensuales (1999-2010) de Radiación neta (R_n) y Temperatura del aire (T_a), con promedios de 24 hrs (1 a 24hrs).	48
Figura 7.- Promedios mensuales (1999-2010) de Radiación neta (R_n) y Temperatura del aire (T_a), con promedios de 12 hrs (8 a 20hrs).	51

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Promedios mensuales de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) para intervalos de tiempo de 24 hrs (1 a 24 hrs), generados con información climatológica del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.	47
Cuadro 2. Promedios mensuales de Radiación neta (R_n) para intervalos de tiempo de 24 hrs (1 a 24 hrs), calculados con los datos del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.	49
Cuadro 3. Promedios mensuales de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) para intervalos de tiempo de 12 hrs (8 a 20 hrs), generados con información climatológica del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.	50
Cuadro 4. Promedios mensuales de Radiación neta (R_n) para intervalos de tiempo de 12 hrs (8 a 20 hrs), calculados con los datos del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.	52
Cuadro 5. Promedios mensuales de evapotranspiración de referencia para promedios de 12 (8 a 20 hrs) y 24 hrs (1 a 24 hrs) de los datos climatológicos, y diferencias mensuales correspondientes.....	54
Cuadro 6. Resultados de la prueba de Wilcoxon para los valores de la evapotranspiración de referencia mensual obtenida con datos climatológicos promedio de 12 y 24 hrs.....	55
Cuadro 7. Evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) calculada para el ciclo primavera-verano (marzo-agosto) y el ciclo otoño-invierno (septiembre-febrero), con promedios climatológicos de 24 y 12 hrs.....	56

Evaluación de la evapotranspiración de referencia con datos promedio a diferentes intervalos de tiempo.

Delfino Vázquez Gutiérrez

RESUMEN

La determinación de la evapotranspiración diaria de los cultivos de una determinada localidad, es información indispensable para la programación de la irrigación y realizar un mejor uso y aprovechamiento del agua. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto del intervalo de tiempo utilizado (12 y 24 hrs) para obtener las variables climáticas promedio requeridas por el método FAO Penman-Monteith, para la determinación la tasa de evapotranspiración de referencia diaria. Se tomo información climática diaria de 1999 a 2010 de los registros llevados a cabo por el observatorio Saltillo, Coahuila, a cargo de la CNA (Comisión Nacional del Agua), para calcular la ET_{ref} , se elaboró un programa mediante el software MathCAD 13, en el que se incluyeron todos los parámetros del método FAO Penman-Monteith, el programa fue diseñado para obtener la ET_{ref} con base a datos promedio diarios de 24 (1 a 24 hrs) y 12 hrs (8 a 20hrs), respectivamente. Los resultados de la investigación mostraron que para todos los meses del año, la evapotranspiración de referencia calculada con datos climatológicos promedio de 12 hrs fue mayor que la obtenida con datos promedio de 24 hrs. La evapotranspiración de referencia total anual fue 11.20% mayor al utilizar datos climatológicos promedio de 12 hrs. La evapotranspiración de referencia calculada con datos climatológicos promedio de 12 y 24 hrs fue mayor en el mes de mayo, debido a un valor mayor de la radiación neta y la temperatura del aire en esta localidad geográfica.

Palabras Clave: Evapotranspiración, FAO Penman-Monteith, datos climatológicos, radiación neta, temperatura del aire.

I. INTRODUCCIÓN

La determinación de la evapotranspiración diaria de los cultivos de una determinada localidad, es información indispensable para la programación de la irrigación y para mejorar la eficiencia del uso del agua. Principalmente en las regiones áridas, donde la baja disponibilidad de los recursos hidráulicos es la limitante para la producción agrícola.

La evapotranspiración máxima de un determinado cultivo (ET_{max}) se puede determinar por medio del producto de la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) y un coeficiente de ajuste por desarrollo del cultivo (Kc). (Allen *et al.*, 1994). Existen varios métodos para estimar ET_{ref} (Aguilera y Martínez, 1996; Stefano y Ferro, 1997). Pero, recientemente el método FAO Penman-Monteith se sugiere como el estándar para estimar la evapotranspiración de referencia con validez mundial en los diferentes tipos de clima, por proporcionar resultados más consistentes para determinar la evapotranspiración de los diferentes cultivos (Guevara, 2006).

La ET_{ref} describe la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, además de las prácticas agronómicas de manejo. Este método corresponde a la evapotranspiración desde una superficie de un cultivo hipotético de 0.12 m de altura, $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ de resistencia de la superficie vegetal y 0.23 de albedo, la cual se asemeja a una superficie extensa de grama verde, de altura uniforme, en crecimiento y sin limitaciones de agua (Allen *et al.*, 2006).

Estudios previos (Pire y Rodríguez, 2007), compararon la ET_{ref} obtenida con el método FAO-Penman Monteith y la obtenida con los métodos más frecuentemente utilizados (Blaney-Criddle, Makkink, Penman-Monteith, FAO- Penman-Monteith), midiendo la evapotranspiración del pasto San Agustín (*Stenotaphrum secundatum*) en lisímetros de pesada. Los resultados mostraron que el método FAO-Penman-Monteith tuvo el mejor ajuste con los datos de los lisímetros. Otros estudios (Xu y Singh, 2001; Temesgen *et al.*, 2005; Trezza, 2008,) mostraron que el método FAO-Penman-Monteith tiene más aplicación para las diferentes condiciones climáticas. Sin embargo, Howell *et al.* (1998) indican que el método FAO-Penman-Monteith, tiende a subestimar la tasa diaria de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) a valores elevados de Evapotranspiración y sobrestimar a valores bajos. Resultados similares fueron reportados por Rana *et al.* (1997).

En la mayoría de las estaciones de México el registro de las lecturas de las variables meteorológicas requeridas por el método FAO Penman-Monteith se toman de forma manual durante las 24 hrs del día. La temperatura promedio se estima a partir de la temperatura máxima y mínima registrada en el termómetro de máximas y mínimas, la presión de vapor a saturación y actual se determinan a partir de la temperatura del aire y la humedad relativa, la velocidad del viento es mediada a 2 m de altura del suelo, y debido a que la radiación neta no se mide en las estaciones climatológicas, esta se estima a partir de la radiación solar total incidente, la latitud, altitud del lugar y el día del año. Sin embargo, dado que la radiación solar únicamente ocurre durante el día solar (aproximadamente 12 hrs) y la evapotranspiración de los cultivos también ocurre durante el mismo tiempo, por lo

cual los datos promedio diarios de temperatura, presión de vapor y velocidad del viento también se deberían calcular para días luz (12 hrs), ya que al utilizar promedio de 24 hrs, de dichas variables climáticas se puede subestimar la ET_{ref} por ser menores durante la noche.

OBJETIVO

Determinar el efecto del intervalo de tiempo utilizado (12 y 24 hrs) para obtener las variables climáticas promedio requeridas por el método FAO Penman-Monteith, para estimar la tasa de evapotranspiración de referencia diaria.

HIPÓTESIS

La tasa de evapotranspiración de referencia diaria obtenida con el método FAO Penman-Monteith, es mayor con los datos promedio de 12 hrs de las variables climatológicas, que con los datos promedio de 24 hrs.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Proceso de Evapotranspiración (ET).

La evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmosfera (Burman *et al.*, 1983). Incluye la pérdida de agua a través de la superficie del suelo por evaporación y la pérdida de esta mediante transpiración del cultivo particularmente las hojas. (Domingo *et al.*, 2002). Interviene en el balance hidrológico y energético, asegurando el mantenimiento del ciclo hidrológico. Se estima como promedio global que el 57% de la precipitación anual es transferida a la atmósfera a través de este proceso, pudiendo llegar a valores del 90% y 100% en zonas áridas o desérticas, respectivamente (Sánchez, 1992).

Evaporación.

La **evaporación** es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se remueve de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. (Allen *et al.*, 1998)

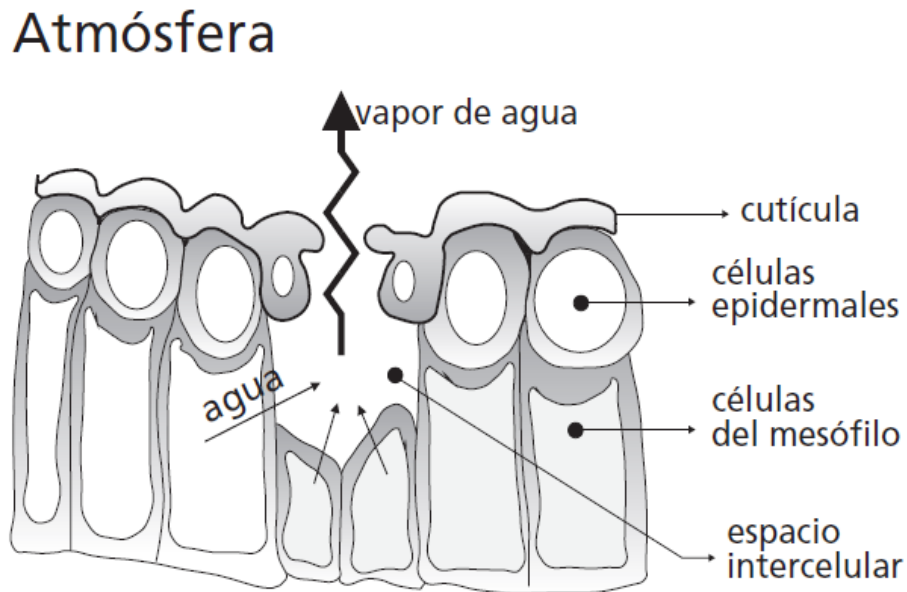
Para cambiar el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere de energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura

ambiente del aire, proporcionan esta energía. La fuerza impulsora para remover el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente si el aire húmedo circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se remueve de alrededor de la hoja. El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende considerablemente de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento son parámetros climatológicos a considerar al evaluar el proceso de la evaporación. (De Santa *et al.*, 2005).

Transpiración.

La **transpiración** consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas. Estos son pequeñas aberturas en la hoja de la planta a través de las cuales atraviesan los gases y el vapor de agua de la planta hacia la atmósfera (Figura 1). El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática. Casi toda el agua absorbida del

suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales. (Rosenberg *et al.*, 1983).

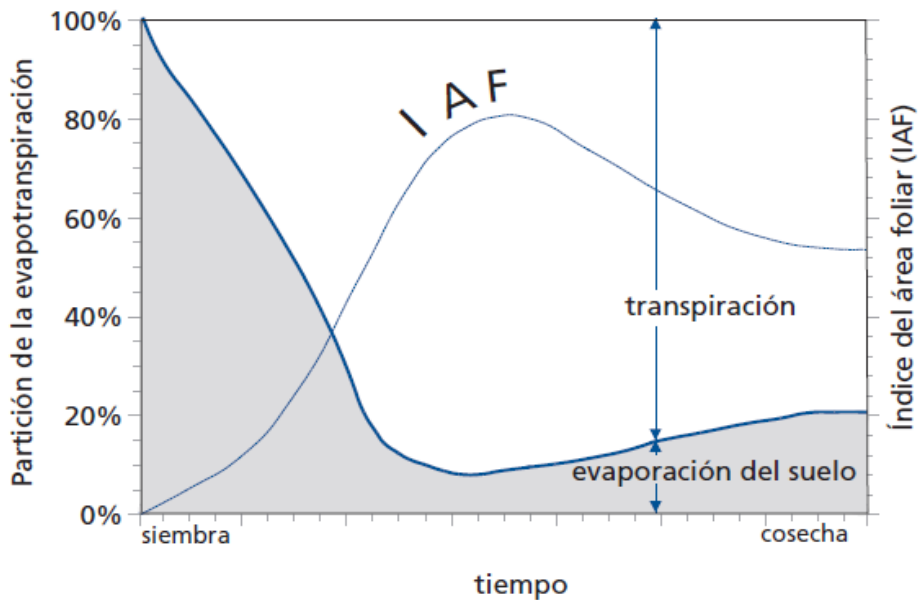


Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 1.- Representación esquemática de un estoma.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces, también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también está 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. (De Santa *et al.*, 2005).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. 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. En la Figura 2 se presenta la evapotranspiración dividida en sus dos componentes (evaporación y transpiración) en relación con el área foliar por unidad de superficie de suelo debajo de él. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración. (Allen *et al.*, 1998)



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.- Repartición de la evapotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual

La Evapotranspiración es afectada por distintos factores los cuales se mencionan a continuación y son presentados en la (Figura 3):

Variables Climáticas: según Ludlow, (1970), los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la velocidad del viento, la temperatura del aire, y la humedad atmosférica.

Factores de Cultivo: Tijerina (1992), citó que los principales factores de las plantas que afectan la evapotranspiración son: el grado de cobertura, el área foliar, la altura del cultivo, la rugosidad de la cobertura y el control estomático de la transpiración.

Manejo y condiciones ambientales: Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, uso limitado de fertilizantes, presencia de estratos duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración (Wilson, 1990).

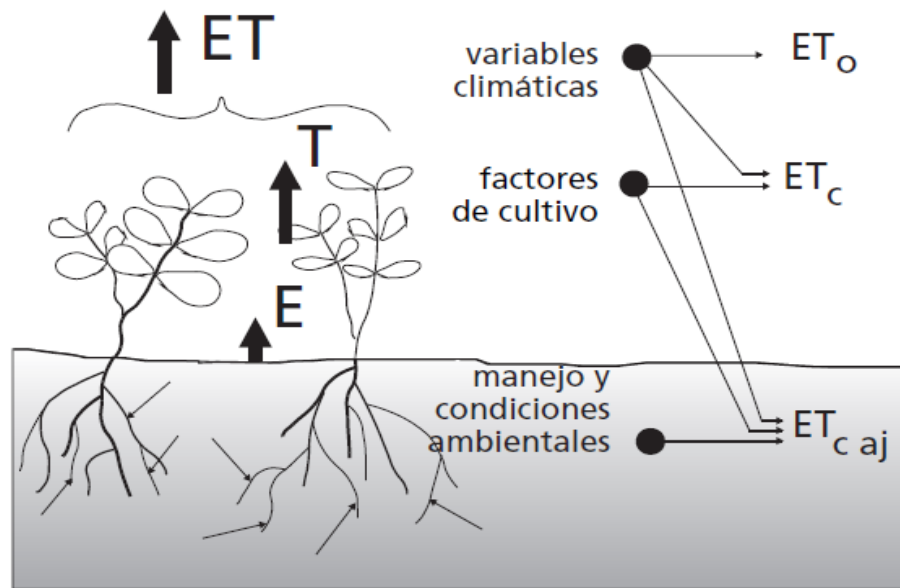


Figura 3.- Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.

2.2 Descripción de la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}).

La evapotranspiración que ocurre a partir de una superficie con vegetación es función de las condiciones meteorológicas del área, así como de las características anatómicas y fisiológicas de la vegetación (Allen *et al.*, 1994). Debido a que las características de la vegetación que afectan el proceso de evapotranspiración tienen una gran variabilidad de una especie a otra, ha existido la tendencia a tratar la evapotranspiración con base en una superficie específica o de referencia, lo que permite evaluar la ET considerando solamente las variables meteorológicas del área en estudio. Por lo tanto, la denominada evapotranspiración de referencia viene a representar un índice climático asociado al área en estudio, lo que la hace útil para la

evaluación de las condiciones de humedad de un área determinada, en equilibrio con su clima. (Trezza, 2008).

La ET_{ref} estima los efectos de las condiciones climáticas sobre la ET_{max} que presenta un tipo vegetal estándar tomado como referencia, habitualmente alfalfa o, más comúnmente, una gramínea, que crece disponiendo de toda el agua necesaria y libre de enfermedades (McKenney y Rosenberg, 1993; Burman y Pochop, 1994).

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas agronómicas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ET_{ref} en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia. (Allen *et al.*, 2006).

El reconocimiento de la significación de la evapotranspiración en las actividades agrícolas y en el manejo de los recursos hídricos, aunado a la utilización de las estaciones automáticas en agro climatología, impulso el uso de la formula de

Penman 1948 para estimar la evapotranspiración en una superficie líquida y en superficies con vegetación. Esta fórmula modificada en 1965 por Monteith y denominada fórmula de Penman-Monteith, ha tenido una relevancia extraordinaria en las investigaciones sobre balance energético, balance hídrico, requerimientos de agua, programas de irrigación, entre otras aplicaciones, desplazando la diversidad de formulaciones utilizadas para estimar la evapotranspiración. (Guevara, 2006).

En 1948, Thornthwaite por un lado y Penman, por otro, definieron el concepto de evapotranspiración potencial (ET_{pot}), que expresaba de forma más exacta la transferencia de agua máxima entre la superficie terrestre y la atmósfera. Thornthwaite definió ET_{pot} como la pérdida de agua que ocurriría al tener el suelo a la humedad adecuada en todo tiempo, es decir, si en ningún momento existiera una diferencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación. Para Penman la evapotranspiración Potencial es el consumo de agua de un cierto cultivo de poca altura que cubre totalmente el suelo y no presenta déficit hídrico.

Dado que el concepto de (ET_{pot}) era difuso, pues cada tipo de planta evapotranspira una cantidad de agua diferente, después de varias décadas, Doorenbos y Pruitt (1975, 1977) expresaron una nueva definición de la evapotranspiración, que fue la Evapotranspiración de referencia (ET_{ref}). Con apoyo de la Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) en su guía para las necesidades hídricas de los cultivos. Dicha definición dice que la ET_0 es la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa

de gramíneas verdes, de 0.8 a 0.15 m de altura, uniforme, en crecimiento activo, que sombrean completamente el suelo y que no tiene limitaciones de agua (Doorenbos y Pruitt, 1975, 1977).

2.3 Descripción de la evapotranspiración de referencia por el método FAO-Penman Monteith.

Posteriormente, en mayo de 1990, un panel de expertos e investigadores en riego fue organizado por la FAO, en colaboración con la Comisión Internacional Para el Riego y Drenaje (ICID) y con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), con el fin de revisar las metodologías previamente propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos, irrigación y drenaje utilizados hasta la fecha, para adaptarse a los avances surgidos desde los años 70 y pública en 1998 (Allen *et al.*, 1998) un manual denominado Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Es allí donde se indican las recomendaciones más adecuadas sobre la estimación de la evapotranspiración y el uso de la formula FAO Penman-Monteith. En esta publicación está el concepto de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}), tal como se utiliza actualmente, es decir: “La evapotranspiración desde una superficie de un cultivo hipotético de 0.12 m de altura, $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ de resistencia de la superficie vegetal y 0.23 de albedo, la cual se asemeja a una superficie extensa de grama verde, de altura uniforme, en crecimiento y sin limitaciones de agua” (Allen *et al.*, 1998).

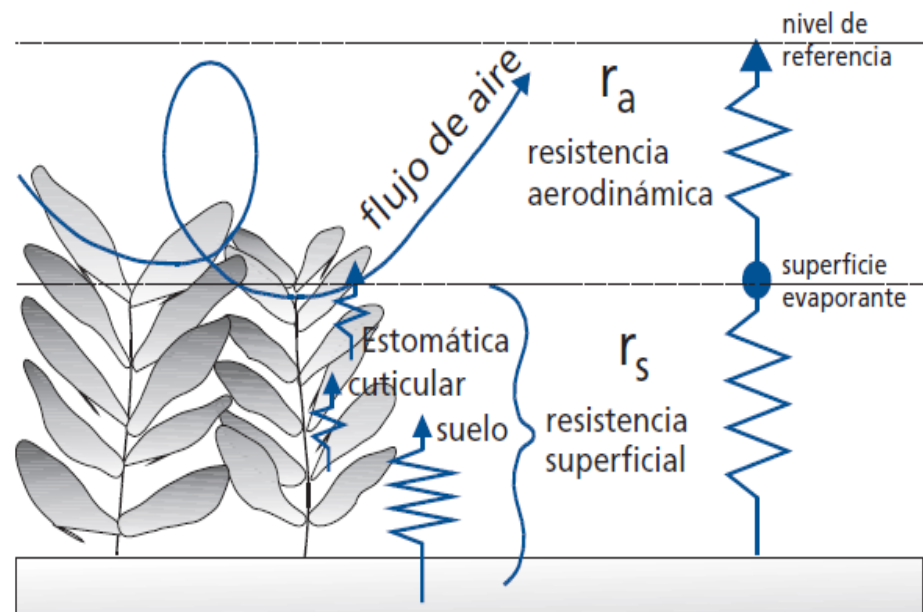
La fórmula de FAO Penman-Monteith es ampliamente recomendada como el método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia con validez mundial en los diferentes tipos de clima, por proveer resultados más consistentes para el uso real del agua por los cultivos y ha sido comprobada fehacientemente por organismos especializados, incluyendo la Organización Meteorológica Mundial. (Guevara, 2006).

Walter *et al.*, 2000 afirman que ambas características, tanto la estandarización de la ecuación como de los cultivos de referencia, proporcionan una mejor estimación horaria y diaria de ET_{ref} .

2.4 Antecedentes de la fórmula FAO Penman-Monteith.

Penman en 1948, combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método conocido como combinado fue desarrollado posteriormente por muchos investigadores y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia. La nomenclatura sobre resistencia distingue entre la resistencia aerodinámica y la resistencia superficial (Figura 4). Los parámetros de la resistencia superficial de la vegetación r_s , describe la resistencia al flujo de vapor a través de los estomas, del área total de la hoja y de la superficie del suelo. La resistencia

aerodinámica, r_a , describe la resistencia en la parte inmediatamente superior a la vegetación e incluye a la fricción que sufre el aire al fluir sobre superficies vegetativas. Aunque el proceso del intercambio en la vegetación es demasiado complejo para ser descrito completamente por los dos factores de resistencia mencionados, con esta estimación se obtienen buenas correlaciones entre los valores medidos y calculados de evapotranspiración, especialmente en el caso de una superficie de pasto uniforme. (Allen *et al.*, 2006).



Fuente: Allen *et al.* (1998)

Figura 4.- Representación simplificada de la resistencia superficial (r_s) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua (r_a).

La ecuación combinada de Penman-Monteith se representa de la siguiente forma:

$$\lambda ET = \frac{S(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{S + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

Donde:

λET = Flujo de calor latente ($J m^{-2} d^{-1}$).

R_n = Radiación neta ($J S^{-1} m^{-2}$),

G = Flujo del calor en el suelo, ($J S^{-1} m^{-2}$),

$(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor del aire (Pa),

ρ_a = Densidad media del aire a presión constante ($kg m^{-3}$),

c_p = Calor específico del aire ($J kg^{-1} K^{-1}$),

S = Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($Pa K^{-1}$),

γ = Constante psicrométrica, ($Pa K^{-1}$),

r_s = Resistencia de la superficie al flujo de vapor de agua ($s m^{-1}$),

r_a = Resistencias aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua ($s m^{-1}$).

Según lo formulado arriba, el enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor (evapotranspiración) de grandes extensiones uniformes de vegetación. (Stewart, 1989). La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse fácilmente de datos meteorológicos. La ecuación se puede utilizar para el cálculo directo de la evapotranspiración de cualquier cultivo pues las resistencias superficial y

aerodinámica son específicas para cada cultivo. De dicha fórmula se deduce que el ritmo de evapotranspiración se incrementa linealmente con el incremento de la radiación neta (R_n) y con el incremento del déficit de saturación de la presión del vapor del agua ($e_s - e_a$), asimismo con el incremento de la velocidad del viento, dado que la resistencia aerodinámica es inversamente proporcional a la velocidad del viento. (De Santa *et al.*, 2005).

Resistencia aerodinámica (r_a)

La transferencia de calor y de vapor de agua desde la superficie evaporante hacia el aire que se encuentra sobre la planta, está determinada por la resistencia aerodinámica:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (2)$$

Donde:

r_a = Resistencia aerodinámica al flujo de calor y vapor de agua [$s \text{ m}^{-1}$],

z_m = Altura de medición del viento [m],

z_h = Altura de medición de humedad [m],

d = Plano de altura de desplazamiento cero [m],

z_{om} = Longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momento [m],

z_{oh} = Longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua [m],

k = Constante de Von Karman, 0.41 [-],

u_z = Velocidad del viento a la altura z [m s^{-1}].

La ecuación 2 se restringe a condiciones neutras de estabilidad, es decir, condiciones en las que la temperatura, la presión atmosférica, y la distribución de la velocidad del viento siguen condiciones casi adiabáticas (sin intercambio de calor). El uso de la ecuación para períodos cortos (horarios o menores) podría requerir la inclusión de correcciones de estabilidad. Sin embargo, al predecir ET_{ref} en la superficie de referencia bien regada, el intercambio de calor es pequeño, y por lo tanto normalmente no se requiere la corrección para la estabilidad. Muchos estudios han explorado la naturaleza del régimen del viento en el dosel de las plantas. Las alturas de desplazamiento cero y las longitudes de rugosidad tienen que ser consideradas cuando la superficie está cubierta por vegetación. Los factores dependen de la altura del cultivo y de su arquitectura. Para una amplia gama de cultivos, especialmente aquellos que presentan superficies relativamente homogéneas, los conceptos de altura de desplazamiento cero, d [m], y los parámetros de transferencia del momento que gobierna la longitud de la rugosidad, z_{om} [m], y los de longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor, z_{oh} [m], se pueden estimar desde la altura del cultivo h [m] por medio las siguientes ecuaciones (Allen *et al.*, 1998):

$$d = 2/3 h \quad (3)$$

$$z_{om} = 0.123 * h \quad (4)$$

$$z_{oh} = 0.1 * z_{om} \quad (5)$$

El valor de resistencia aerodinámica es dependiente de la velocidad del viento, e inversamente proporcional a dicha velocidad, tal como se refleja en la ecuación 2. Para una cubierta de gramíneas de 0.12m de altura, que es el caso de la superficie de referencia en la que las magnitudes se miden a 2 m de altura, la aplicación de las relaciones dadas en las ecuaciones 2, 3,4 y 5 conducen a una $r_a = 208/u_2$.

Resistencia superficial (r_s).

La resistencia superficial describe la resistencia al flujo de vapor a través del cultivo transpirante y de la superficie evaporante de suelo. En casos en que la vegetación no cubra totalmente el suelo, el factor de resistencia debe incluir de hecho los efectos de la evaporación de la superficie del suelo. Si el cultivo no está transpirando de manera potencial, la resistencia depende también del estado del agua dentro de la planta. Una aproximación aceptable de una relación muy compleja de la resistencia superficial de una vegetación densa que cubre completamente el suelo es (Allen *et al.*, 1998):

$$r_s = \frac{r_l}{IAF_{\text{activo}}} \quad (6)$$

Donde

r_s = Resistencia superficial (total) [$s\ m^{-1}$],

r_l = Resistencia estomática total de una hoja bien iluminada [$s\ m^{-1}$],

IAF_{activo} = Índice activo de área foliar [m^2 (área de la hoja) m^{-2} (superficie del suelo)].

El Índice de Área Foliar (IAF), es una cantidad adimensional, que presenta el área de la hoja (lado superior solamente, iluminada de un cultivo denso) por unidad de área de suelo debajo de ella. Se expresa como m^2 área foliar por m^2 de área de suelo. El IAF_{activo} es el índice del área foliar que contribuye activamente a la transferencia superficial de calor y de vapor. Los valores de IAF para los diferentes cultivos difieren grandemente pero valores de 3 a 5 son comunes para muchos cultivos desarrollados. Para un cultivo dado, el IAF cambia a lo largo del periodo de crecimiento y alcanza normalmente su máximo valor antes o en la floración. El IAF también depende de la densidad de las plantas y de la variedad del cultivo. La resistencia estomática r_i , es la resistencia media de una hoja individual. Esta resistencia es específica para cada cultivo y difiere entre variedades del cultivo y su manejo agronómico. Usualmente aumenta con la edad del cultivo y llega al máximo cuando éste madura. La resistencia estomática, r_i , está influenciada por el clima y por la disponibilidad de agua, sin embargo, estas influencias varían de un cultivo a otro y diversas variedades pueden ser afectadas diferentemente. La resistencia aumenta cuando el cultivo se encuentra limitado de agua y la disponibilidad de agua en el suelo limita la evapotranspiración del cultivo.

Una ecuación general para IAF_{activo} es (Sceicz y Long, 1969; Jensen *et al.*, 1990):

$$IAF_{\text{activo}} = 0.5 \cdot IAF \quad (7)$$

Ecuación que toma en consideración el hecho de que en general solamente la mitad superior del pasto denso está contribuyendo activamente a la transferencia superficial de calor y vapor de agua. Para el pasto una ecuación general para IAF es (Allen *et al.* 1998):

$$IAF = 24 * h \quad (8)$$

Donde:

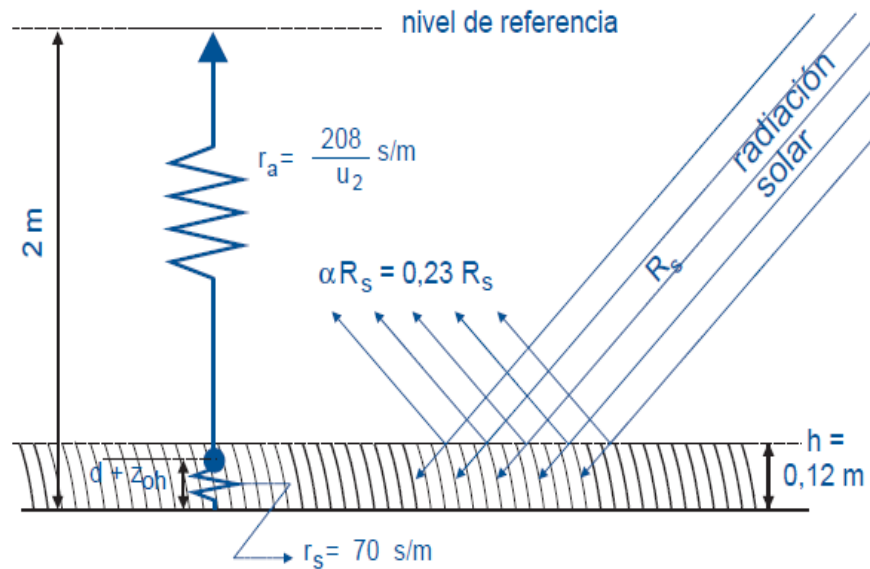
h= Altura del cultivo [m].

La resistencia estomática total r_i , es un parámetro dinámico que cambia con la iluminación solar, déficit de presión de vapor de agua entre la hoja y su entorno, concentración de dióxido de carbono, temperatura de las hojas y potencial del agua en el suelo (Stewart, 1989). La integración de estos parámetros en un modelo para reflejar la resistencia estomática se puede encontrar en Jarvis (1976) y Sellers *et al.*, (1997). Un valor típico de $r_i = 100 \text{ s m}^{-1}$, que sustituyendo en la ecuación 6 los parámetro de las ecuaciones 7 y 8 nos da como resultado el valor de $r_s = 70 \text{ s m}^{-1}$.

2.5 Ecuación de FAO Penman-Monteith

El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración de la referencia y aconsejó sobre los procedimientos para el cálculo de los varios parámetros que la fórmula incluye. El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia

como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. (Allen *et al.*, 2006)



Fuente: Allen *et al.* (1998)

Figura 5.- Características del cultivo hipotético de referencia

El método de FAO Penman-Monteith para estimar ET_{ref} es derivado de la ecuación combinada de Penman-Monteith (Ecuación 1) así como de las ecuaciones de la resistencia aerodinámica (Ecuación 2) y superficial (Ecuación 6). Por lo que en este trabajo se realizó con la ecuación sin derivar únicamente las variables requeridas se introducirán como promedios diarios (ciclos de 24 horas en lugar de un segundo) (Ecuación 9).

$$\lambda ET_{\text{ref}} = \frac{S(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a} (3600 * 24)}{S + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (9)$$

Donde

λET_0 = Flujo de calor latente de referencia ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),

G = Flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),

ρ_a = Densidad media del aire a presión constante (kg m^{-3}),

c_p = Calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$),

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa),

e_a = Presión real de vapor (kPa),

$(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor (kPa),

S = Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{K}^{-1}$),

γ = Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{K}^{-1}$),

r_s = Resistencia de la superficie al flujo de vapor de agua (s m^{-1}),

r_a = Resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua (s m^{-1}).

La Evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) se obtiene dividiendo el flujo de calor latente de referencia (λET_{ref}) por el calor de vaporización del agua (λ).

Comparaciones de la ecuación FAO Penman-Monteith con la ecuación Penman-Monteith original efectuadas por Allen *et al.* (1994), en 11 localidades climáticas distintas sobre una cubierta vegetal de pasto de 0.12 m de alto, mostraron

una equivalencia general para la nueva definición de ET_{ref} al detectarse diferencias menores al 3% entre ambos métodos con una pendiente igual a 1 y un $r^2=0.99$ ($n=100$) en los análisis diarios, mientras que en los horarios el error estándar de la estimación fue de 0.02 mm/h (7% de la ET_{ref}).

2.6 Descripción de las variables climatológicas requeridas por el método FAO-Penman-Monteith.

Debido a que la radiación neta no se mide en las estaciones climatológicas de México, esta se estima a partir de la radiación solar total incidente, la latitud, altitud del lugar y el día del año. La presión de vapor a saturación y actual se determinan a partir de la temperatura del aire y la humedad relativa. La resistencia aerodinámica (r_a) se determina con la información del viento a 2 m de altura del suelo, mientras que para la resistencia de la superficie al flujo de vapor de agua se asume un valor de 70 s m^{-1} para las condiciones de pasto como referencia.

Localización

La altura sobre el nivel del mar (m) de la zona para la que se determina la ET_{ref} y su latitud (grados norte o sur) deben ser especificados. Estos datos son necesarios para ajustar algunos parámetros climáticos al valor medio local de la presión atmosférica (función de la elevación del sitio sobre nivel del mar) y para

calcular la radiación extraterrestre (R_a) y, en algunos casos, la duración máxima de la insolación (N).

Temperatura del aire

La temperatura juega un papel importante porque el calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo haciendo que a temperaturas altas la ET se incremente y temperaturas bajas la ET disminuya, (Allen *et al.*, 2006).

Humedad atmosférica

La humedad del aire contribuye en el proceso de ET. En condiciones de alta humedad la ET es baja, ya que la diferencia de presión del aire circundante y la superficie evapotranspirante disminuye. La diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirante y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor.

Radiación solar

La radiación solar define la cantidad de energía disponible para evaporar el agua, aunque no toda la energía disponible se utiliza para la evaporación; parte de esta energía se emplea para calentar la atmósfera y el suelo, (Allen *et al.*, 2006, Fernández *et al.*, 2010). La radiación solar es la principal fuente de energía para que

se produzca la evaporación, cambio de estado del agua de líquido a vapor. 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 atmosfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación.

Velocidad del viento

El viento influye en la remoción de agua de la superficie evaporante, porque renueva constantemente el aire circundante a la planta. Si no existiera esta sustitución, la velocidad de transpiración disminuye hasta lograr condiciones de equilibrio en el aire circundante.

La demanda evapotranspiratoria es alta en 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 cuanto más seca este la atmosfera, más grande será el efecto sobre la ET. 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)

2.7 Descripción del procedimiento que se utiliza para determinar los valores promedio diarios de las variables climatológicas requeridas por el método FAO Penman-Monteith.

En la mayoría de las estaciones de México el registro de las lecturas de las variables meteorológicas requeridas por el método FAO Penman-Monteith se toman de forma manual durante las 24 hrs del día.

La temperatura promedio se estima a partir de la temperatura máxima y mínima registrada en el termómetro de máximas y mínimas durante el tiempo transcurrido desde la última medida efectuada. La presión de vapor a saturación y actual se determinan a partir de la temperatura del aire y la humedad relativa.

La velocidad del viento se mide con los anemómetros. Los anemómetros usados comúnmente en las estaciones meteorológicas se componen de cazoletas o propulsores que giran sobre un eje gracias a la fuerza del viento. El conteo del número de revoluciones en un periodo dado, permite determinar la velocidad promedio del viento en dicho periodo.

La radiación solar puede ser medida con piranómetros, radiómetros o solarímetros. Los instrumentos contienen un sensor instalado en una superficie horizontal que mide la intensidad de la radiación solar total, es decir, la suma de la radiación solar directa y la difusa que ocurre cuando el cielo está cubierto. El sensor es protegido y mantenido en una atmosfera seca usando una bóveda de cristal que se limpia regularmente.

Sin embargo, dado que la radiación solar únicamente ocurre durante el día solar (aproximadamente 12 hrs) y la evapotranspiración de los cultivos también ocurre durante el día solar, los datos promedio diarios de temperatura, humedad relativa, presión barométrica y velocidad del viento también se deben calcular para días luz (12 hrs).

En las estaciones automatizadas se generan datos horarios, los valores promedio se obtienen con los datos promedios de las 24 horas del día.

2.8 Estudios previos donde se a utilizado la ecuación FAO-Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia.

Sánchez, *et al.* (1995), bajo condiciones climáticas semiáridas mediterráneas, en la Región de Murcia (Valle del Guadalentín), verifico la validez de los modelos FAO de estimación de la evapotranspiración de referencia ET_{ref} Penman FAO, ET_{ref} Radiación FAO y la reciente definición propuesta por la FAO basada en la ecuación de Penman-Monteith. Las estimaciones decadales, durante dos años agrícolas se contrastaron con las correspondientes medidas de evapotranspiración de referencia de gramíneas obtenidas con lisímetro. Y concluyo que el modelo FAO Penman-Monteith ofrece resultados muy recomendables al utilizar, para las variables intermedias, las expresiones normalizadas recomendadas en el Sistema Internacional de Unidades.

Mediciones realizadas por Howell *et al.* (1998), durante tres años en condiciones de clima semiárido indicaron que el modelo de FAO Penman-Monteith presenta una clara tendencia a sobrestimar la ET_{ref} diaria a tasa bajas de ET y a subestimarla a tasas altas de ET, con una pendiente de 0.70 mm d^{-1} , un error estándar de las estimaciones de 1.079 mm d^{-1} y un $r^2=0.72$, utilizando mediciones lisimétricas como datos observados. Similares resultados reporta Rana *et al.* (1997) en investigaciones realizadas sobre festuca y ballico (*Lolium perenne*), respectivamente. En tanto que Steduto *et al.* (1996), encontró que el modelo FAO

Penman-Monteith subestimo la ET_{ref} entre un 3 y 5% en estimaciones diarias y horarias bajo condiciones de clima mediterráneo.

Sánchez y Chuvieco (2000), a partir de análisis de regresión múltiple entre valores de evaporación del cultivo de referencia diaria, estimados con el método de Penman-Monteith y diversas variables derivadas de imágenes NOAA-AVHRR, generaron modelos que permiten estimar la ET en la comunidad Autónoma de Andalucía en el periodo comprendido entre los años 1994 y 1997. Los modelos fueron evaluados satisfactoriamente en las estaciones meteorológicas utilizadas, así como también a través de mapas regionales de porcentajes de variación entre valores observados y estimados. De acuerdo con estos resultados es posible afirmar la utilidad de la teledetección en la determinación de la ET_{ref} a escala regional

Lecina y Martínez. 2000, efectuaron una evaluación del método FAO Penman-Monteith para la estima de valores semihorarios de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) bajo las condiciones semiáridas del Valle del Ebro, mediante su comparación con valores medidos en un lisímetro de pesada. Calculando valores de ET_{ref} con cuatro variantes de dicho método. En tres de ellas (ETPM1, ETPM2, ETPM3), la radiación neta (R_n) y el flujo de calor hacia el suelo (G) se han estimado como indica la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (Allen *et al.*, 1998) y en la cuarta (ETPM4) se han utilizado valores medidos de R_n y G . En el caso de ETPM1, se han utilizado valores medidos de radiación solar (R_s) y un factor de turbidez $k_{tb} = 1.0$ para estimar la radiación solar en días despejados

(R_{so}). En el caso de ETPM2, se ha usado un factor $k_{tb} = 0.85$, mientras que en el caso de ETPM3, los valores medidos de R_s se han multiplicado por la pendiente de regresión entre R_s medida en días despejados y R_{so} . Los resultados indican que no existen diferencias significativas entre las variantes ETPM1 y ETPM2. Se han observado diferencias significativas con la variante ETPM3, pero probablemente dichas diferencias se reducirían fuertemente si los valores medidos de R_s sólo se hubiesen modificado para valores superiores a 700 W m^{-2} . Los resultados de la variante ETPM4 fueron diferentes a los de los otros casos, y sugieren que el procedimiento de la FAO sobrestima R_n . Los resultados de este trabajo apuntan a que la advección fue la principal causa de la infraestimación observada: hasta un 15% en el verano y un 4-5 % en el otoño.

Villaman *et al.* (2001), con el propósito de estudiar cuáles métodos micrometeorológicos estiman mejor la evapotranspiración (ET) en tiempo real para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.), comparo los métodos Thornthwaite–Holzman, Aerodinámico, Balance de energía (Relación de Bowen), Sistema de Bowen y Penman–Monteith, con la evapotranspiración medida en el lisímetro de pesada como referencia, y obtuvo como resultado que la evapotranspiración calculada por el método de Penman-Monteith, el Balance de energía y la medida con el Sistema de Bowen fueron los que mejor estimaron la ET.

Trezza (2008), analizó varias metodologías disponibles para realizar estimaciones de ET_{ref} a nivel mensual en Venezuela a partir de la información de

estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes regiones del país. Y encontró que el procedimiento de FAO Penman-Monteith es el más aplicable para esas condiciones climáticas. La ecuación de Thornthwaite y la de radiación no resultaron convenientes ya que sobreestimaban considerablemente los valores de ET_{ref} . El método de Blaney-Criddle puede aplicarse en zonas de baja altitud cuando solo se cuente con datos de temperatura media del aire.

Trezza, *et al.* (2008), con el objeto de maximizar la eficiencia del uso del agua en la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) cultivada bajo riego por aspersión en la zona semiárida del estado de Lara, Venezuela, realizó la programación del riego mediante la aplicación del balance hídrico en el suelo. Utilizó la metodología FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración del cultivo y el balance diario de la humedad del suelo. Los resultados señalaron que la operación actual del sistema de riego bajo la modalidad de frecuencia y lamina de riego fijas, genera pérdidas excesivas de agua por percolación profunda en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, así como situaciones de déficit hídrico en las etapas de máxima demanda, lo que traería consigo una reducción del rendimiento de la caña de azúcar. En el estudio se propone manejar el calendario de riego en la zona manteniendo la frecuencia de riego fijo pero aplicando una lamina de riego variable definida según el agotamiento de humedad en la zona de las raíces del cultivo.

Pire y Rodríguez (2007), midieron la ET_{ref} en Tarabana, estado de Lara, mediante el empleo de lisímetros de pesada en los que utilizó grama San Agustín

como cultivo de referencia, la ET_{ref} obtenida la compararon con la calculada mediante los principales métodos de estimación conocidos para obtener la ecuación de mejor ajuste. Resultado así que la ecuación de Penman-Monteith reprodujo mejor los valores de ET_{ref} obteniendo que la mayor ET_{ref} para ese municipio ocurrió en abril (5.50 mm d^{-1}) y la menor en enero (4.10 mm d^{-1}).

2.9 Aplicaciones de la ecuación FAO-Penman-Monteith.

El conocimiento de los valores de la evapotranspiración es importante por las aplicaciones que se pueden derivar. Aguilera y Martínez (1996), indicaron las siguientes aplicaciones: a) Para determinar el área que puede regarse con un determinado volumen de agua disponible. b) Es la base para elaborar calendarios teóricos de riego de cultivos. c) Estimar los volúmenes de agua que sean necesarios para auxiliar a los cultivos en caso de que la lluvia sea insuficiente para su buen desarrollo. d) Para determinar en grandes áreas o cuencas, volúmenes de agua que se requieran drenar. e) Para seleccionar los cultivos más adecuados en zonas de agricultura de temporal. f) Permite determinar la lámina adicional de riego necesaria para la prevención de problemas de ensalitramiento de los suelos. g) Permite determinar, en forma general, la eficiencia con la que se está aprovechando el agua y, por lo mismo, planear debidamente el mejoramiento y la superación de todo el conjunto de actividades que se generan en los Distritos de Riego para proporcionar el agua a los cultivos oportunamente.

Conociendo la ET_{ref} correspondiente a la superficie vegetal específica o estándar es posible definir coeficientes empíricos para calcular la ET correspondiente a otras cubiertas (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1998). Estos coeficientes permiten dimensionar las demandas hídricas de una zona agrícola o forestal y programar debidamente el riego, consiguiéndose así que la evapotranspiración real o efectiva se iguale al máximo requerimiento de la vegetación, obteniendo los mejores rendimientos y haciendo un uso eficiente del agua.

La evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) provee un estándar de comparación mediante el cual se puede comparar la evapotranspiración en diversos períodos del año o en otras regiones y a partir de esta se puede obtener la evapotranspiración de otros cultivos. (Allen *et al.*, 2006)

Conociendo la ET_{ref} es posible obtener la ET_{max} de cultivos lo que permite una adecuada gestión de los recursos hídricos y económicos necesarios para la construcción de obras de irrigación y la planificación del riego (Valenzuela y Ferreira, 1985; Hargreaves, 1994; Xu y Singh, 2001; Droogers y Allen, 2002; Temesgen *et al.*, 2005; López *et al.*, 2009), especialmente en las zonas con una estación seca que coincide con la de mayores requerimientos de agua por los cultivos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Procedencia y tratamiento previo de la información climática requerida por el método FAO Penman-Monteith.

Como se describió previamente las variables climáticas requeridas por el método FAO Penman-Monteith son la temperatura del aire, presión de vapor, velocidad del viento y radiación solar, esta información fue proporcionada por el Observatorio Saltillo, Coahuila con clave 76390 ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en las coordenadas 25°22'35" N y 101°01'00" O, a 1790 msnm. A cargo de la CNA (Comisión Nacional del Agua).

La información climática registrada en dicho observatorio es horaria durante las 24 horas del día y durante los 365 días del año. Los datos se escriben en hojas de registro por observaciones directas de los diferentes sensores. Para el estudio, los datos de 1999 a 2010 fueron capturados en archivos Excel. Los datos faltantes se estimaron con el promedio de los datos de las dos horas previas, mas los de las dos horas siguientes, respecto a la hora del dato faltante.

Los datos diarios de radiación solar total incidente se obtuvieron integrando los datos de cada hora desde la salida hasta la puesta del sol. Para cada día de los diferentes meses de 1999 a 2010, se generaron dos tablas de valores promedio diarios de temperatura del aire, presión de vapor, velocidad del viento y presión

barométrica. Una para promedios de 24 hrs (1 a las 24 hrs) y la otra para promedios de 12 hrs (8 a 20 hrs).

3.2 Descripción de la Ecuación del método FAO Penman-Monteith

La ecuación que describe el método FAO Penman-Monteith, se describe con la ecuación (9). (Allen *et al.*, 1998)

$$\lambda ET_{\text{ref}} = \frac{S(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a} (3600 * 24)}{S + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (9)$$

Donde

λET_{ref} = Flujo de calor latente de referencia ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),

G = Flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$),

ρ_a = Densidad media del aire a presión constante (kg m^{-3}),

c_p = Calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$),

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa),

e_a = Presión real de vapor (kPa),

$(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor (kPa),

S = Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{K}^{-1}$),

γ = Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{K}^{-1}$),

r_s = Resistencia de la superficie al flujo de vapor de agua (s m^{-1}),

r_a = Resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua (s m^{-1}).

Evapotranspiración de referencia (ET_{ref})

La Evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) se obtiene dividiendo el flujo de calor latente de referencia (λET_{ref}) por el calor de vaporización del agua (λ). El calor latente de vaporización, λ expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. Cuanto más elevada sea la temperatura, menos energía será requerida. Como λ varía levemente dentro de rangos de temperaturas normales, se considera un valor constante de 2.45 MJ kg^{-1} para la simplificación de la ecuación de FAO Penman-Monteith. Este valor corresponde al calor latente de vaporización a una temperatura del aire de alrededor de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Radiación neta en la superficie del cultivo (R_n)

La radiación neta, R_n , es la diferencia entre la radiación entrante y saliente de longitudes de onda cortas y largas. Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta (R_{ns}) y la radiación de onda larga saliente neta (R_{nl}). La R_n es normalmente positiva durante el día y negativa durante la noche. El valor diario total para R_n es casi siempre positivo para 24 horas, excepto en condiciones extremas de latitudes elevadas. De esta forma la R_n se determina a través de la siguiente ecuación (Allen *et al.*, 1994)

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (10)$$

Donde:

R_{ns} = Radiación neta de onda corta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), (Ecuación 11)

R_{nl} = Radiación neta de onda larga ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), (Ecuación 12)

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \approx 0.77R_s \quad (11)$$

Donde:

R_s = Radiación solar medida ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), (Dato climático)

α = albedo o coeficiente de reflexión 0.23 (para un cultivo hipotético de referencia de Pasto).

$$R_{nl} = \sigma * T_a_K^4 * (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (12)$$

Donde:

σ =Constante de Stefan-Boltzmann ($4.903 * 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),

T_a = Temperatura del aire ($^{\circ}\text{K}$), (Dato climático)

e_a = Presión de vapor actual (kPa), (Dato climático)

R_{so} = Radiación solar calculada para un día despejado ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), (Ecuación 13)

$$R_{SO} = (0.75 + 2 * 10^{-5} * z) R_a \quad (13)$$

Donde:

z = Elevación de la estación sobre el nivel del mar (m),

R_a = Radiación extraterrestre ($MJ m^{-2} d^{-1}$), (Ecuación 14)

$$R_a = \frac{1440}{\pi} * G_{SC} * d_r [\omega_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega)] \quad (14)$$

Donde:

G_{sc} = Constante solar ($0.0820 MJ m^{-2} s^{-1}$),

d_r = Distancia relativa inversa Tierra-Sol, (Ecuación 15)

ω_s = Ángulo de radiación a la puesta del sol, (Ecuación 17)

φ = Latitud (rad),

δ = Declinación solar (rad), (Ecuación 16)

La latitud, φ expresada en radianes es positiva para el hemisferio norte y negativa para el hemisferio sur.

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} JD\right) \quad (15)$$

Donde:

JD = Numero del día del año (1 de enero al 31 de diciembre)

$$\delta = 0.409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} \text{JD} - 1.39\right) \quad (16)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) * \tan(\delta)] \quad (17)$$

Flujo del calor del suelo (G)

El flujo del calor del suelo, G, es la energía que se utiliza para calentar el suelo. G tiene valores positivos cuando el suelo se calienta y negativos cuando el suelo se enfría. Aunque el flujo calórico del suelo es pequeño comparado con R_n y puede ser no considerado con frecuencia, la cantidad de energía ganada o perdida por el suelo en este proceso teóricamente debe restarse o agregarse a R_n para estimar la evapotranspiración. El flujo de calor del suelo se puede determinar en forma aproximada para cálculos horarios durante el día sobre una cubierta densa de pasto tal como se muestra a continuación (Allen et al., 1994, 1998):

$$G = 0.10 * R_n \quad (18)$$

Densidad media del aire a presión constante (ρ_a)

Según Ortega (1993) la densidad del aire puede ser estimada como sigue:

$$\rho_a = \frac{3.484 * (P - e_a)}{T_a + 273.16} \quad (19)$$

Donde:

ρ_a = Densidad media del aire a presión constante(kg m⁻³)

P=Presión atmosférica (kPa) (Dato Climático)

e_a = Presión real de vapor (kPa) (Dato Climático)

T_a = Temperatura del aire (°C) (Dato Climático)

Calor específico del aire (c_p)

El calor específico es la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura de una unidad de masa de aire en 1° C a presión constante. Su valor depende de la composición del aire, fundamentalmente de su humedad. Para condiciones atmosféricas medias se puede utilizar el valor $c_p = 1.013 * 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Presión de vapor de saturación (e_s)

La presión de saturación de vapor puede ser calculada en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e_s(T_a) = 0.6108 * \exp \left[\frac{17.27 * T_a}{T_a + 237.3} \right] \quad (20)$$

Donde:

$e_s(T_a)$ =Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire (kPa)

T_a = Temperatura del aire (°C) (Dato climático)

Presión real de vapor (e_a)

Presión ejercida por el vapor de agua contenido en el aire.

Déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$)

El déficit de presión de vapor es la diferencia entre la presión de saturación de vapor (e_s) y la presión real de vapor (e_a) durante un determinado periodo.

Pendiente de la curva de presión de vapor (S)

Para el cálculo de evapotranspiración, se requiere calcular la pendiente de la relación entre la presión de saturación de vapor y la temperatura del aire, S, La pendiente de la curva a una temperatura dada se da por un polinomio de tercer grado como se indica en la ecuación (21):

$$S(T_a) = (\beta_1 + 2\beta_2 T_a + 3\beta_3 T_a^2 + 4\beta_4 T_a^3) * 0.001 \quad (21)$$

Donde:

S= Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa K⁻¹)

Ta= Temperatura del aire (°C)

Los parámetros de regresión del polinomio son:

$$\beta_1 = 42.22$$

$$\beta_2 = 1.675$$

$$\beta_3 = 1.408 \cdot 10^{-2}$$

$$\beta_4 = 5.818 \cdot 10^{-4}$$

Constante psicrométrica (γ)

La constante psicrométrica es una función principal de la presión atmosférica y el calor de vaporización y puede ser estimada de la siguiente forma:

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\varepsilon * \lambda} \quad (22)$$

Donde:

γ =Constante psicrométrica (kPa K⁻¹)

λ = Calor latente de vaporización del agua (2.45 * 10⁶ J kg⁻¹)

c_p = Capacidad calorífica del aire a presión constante (1 013 J kg⁻¹ K⁻¹)

P=Presión barométrica de la localidad (kPa)

ε = Relaciona entre el peso molecular de vapor de agua y el del aire seco
(0.622)

Resistencia de la superficie al flujo de vapor de agua (r_s)

Describe la resistencia al flujo de vapor a través del cultivo transpirante y de la superficie evaporante de suelo. Y asume un valor constante según el método FAO Penman-Monteith de 70 s m^{-1} para las condiciones de pasto como referencia.

Resistencia aerodinámica del aire al flujo de vapor de agua (r_a)

Es la transferencia de calor y de vapor de agua desde la superficie evaporante hacia el aire que se encuentra sobre la planta. Y esta dada por la siguiente ecuación:

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (23)$$

Donde:

u_2 = Velocidad del viento (m s^{-1}) a 2 m de altura sobre la superficie del suelo.

3.3 Procedimiento de cálculo de la ET_{ref} mediante el método FAO Penman-Monteith.

Para calcular la ET_{ref} , se elaboro un programa mediante el software MathCAD 13, en el que se incluyeron todos los parámetros de la ecuación FAO Penman-Monteith anteriormente mencionados. El programa fue diseñado para obtener la ET_{ref} con base a datos promedio diarios de 24 y 12 hrs, respectivamente.

La diferencia estadística entre la tasa de evapotranspiración mensual obtenida con datos promedio de 12 y 24 hrs, se evaluó con la prueba no paramétrica de Wilcoxon ($\alpha \leq 0.05$), ya que los datos muestran correlación serial.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evapotranspiración de referencia mensual con datos climatológicos promedio de 12 y 24 hrs, y su relación con la Radiación neta y la Temperatura del aire.

En el Cuadro 1, se muestra que la evapotranspiración de referencia promedio mensual (1999 a 2010) obtenida con promedio de 24 hrs (1 a 24 hrs) fue mayor en el mes de mayo (160.339 mm), esto debido a que en este mes se presenta el mayor valor mensual de radiación neta (R_n) y el mayor valor promedio diario mensual de temperatura del aire (Figura 6). La menor evapotranspiración de referencia se observó en el mes de diciembre (74.494mm), donde también se presentaron los valores menores de radiación neta y temperatura del aire (Figura 6).

El mayor coeficiente de variación de la evapotranspiración de referencia (Cuadro 1) se presentó en septiembre (14.06%), ya que en este mes las variaciones de radiación neta son mayores (Cuadro 2), debido a una mayor variación en las condiciones de nubosidad intermitente y por ser el mes de mayor intensidad de lluvia. El menor coeficiente de variación de evapotranspiración se dio en el mes de noviembre (4.46%) ya que en este mes las condiciones de radiación y nubosidad fueron más uniformes durante los 12 años del registro. (Cuadro 2).

Para promedios de 12 hrs (8 a 20 hrs), del mismo registro de 12 años (Cuadro 3), el valor mayor de la evapotranspiración de referencia también ocurrió en el mes de mayo (181.133mm), que también se debió a un valor mayor de R_n y de la

temperatura promedio diaria en este mes (Figura 7). La menor evapotranspiración de referencia se observó en el mes de diciembre (82.158mm), donde también se obtuvieron los valores menores de radiación neta y temperatura del aire (Figura 7).

El coeficiente de variación mayor de la evapotranspiración de referencia (Cuadro 3), también se presentó en septiembre (16.38%), debido a una mayor variación de la R_n (Cuadro 4), ocasionada por la mayor variación en las condiciones de nubosidad y la mayor intensidad de lluvia. El menor coeficiente de variación de la evapotranspiración se dio en el mes de noviembre (4.76%) ya que en este mes, las condiciones de radiación y nubosidad fueron más uniformes durante los 12 años del registro. (Cuadro 4).

Cuadro 1. Promedios mensuales de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) para intervalos de tiempo de 24 hrs (1 a 24 hrs), generados con información climatológica del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1999	91.435	102.168	136.444	179.92	187.247	140.098	149.022	153.121	125.369	87.951	85.068	77.127
2000	86.568	107.104	135.457	160.908	155.572	125.245	165.407	139.924	131.578	96.668	79.334	74.938
2001	75.617	96.067	134.326	144.736	158.903	156.84	158.294	138.624	110.877	117.859	83.398	75.891
2002	88.733	86.914	149.827	163.293	162.721	159.578	134.671	151.662	102.845	110.221	74.406	79.746
2003	74.753	98.013	144.929	153.455	191.015	158.045	130.131	130.177	91.458	95.564	82.445	72.066
2004	65.824	92.982	117.118	133.705	155.489	122.666	132.517	112.734	99.708	100.876	85.035	67.673
2005	74.538	73.485	122.782	137.163	162.686	170.389	136.428	120.411	120.753	92.944	81.594	67.902
2006	75.368	90.01	127.765	147.545	155.377	153.383	128.263	120.224	93.725	89.425	82.047	67.385
2007	69.309	86.982	116.781	136.403	148.854	130.526	116.808	119.532	102.481	107.721	83.339	85.587
2008	75.646	101.292	131.682	155.132	141.95	164.852	133.079	112.918	88.849	96.302	81.973	78.978
2009	78.912	96.935	129.652	152.354	137.586	161.968	157.561	146.57	81.192	101.04	75.617	71.613
2010	82.661	82.936	152.393	147.201	166.665	159.258	119.435	130.315	102.949	108.964	87.659	78.103
Media=	78.280	92.907	133.263	150.985	160.339	150.237	138.468	131.351	104.315	100.461	81.826	74.751
Sx=	7.389	8.972	11.107	12.516	15.212	15.590	14.952	13.894	14.662	8.727	3.651	5.376
Cv=	9.44%	9.66%	8.33%	8.29%	9.49%	10.38%	10.80%	10.58%	14.06%	8.69%	4.46%	7.19%

Sx = desviación estándar de la serie de datos

Cv = coeficiente de variación de los datos

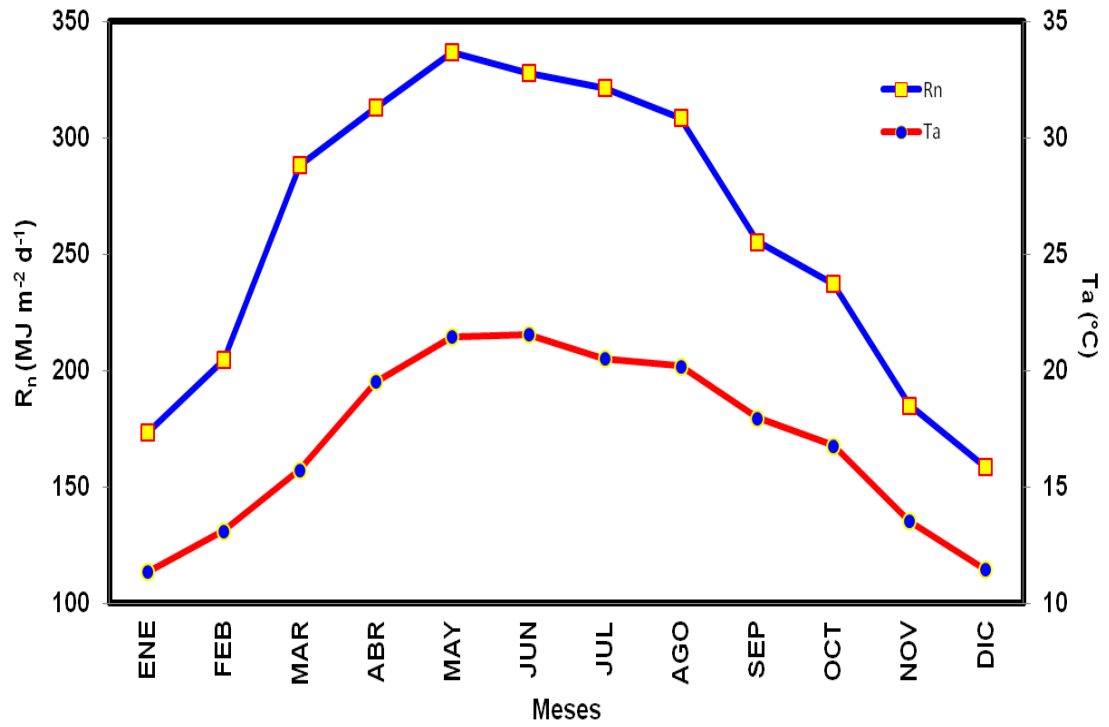


Figura 6.- Promedios mensuales (1999-2010) de Radiación neta (R_n) y Temperatura del aire (T_a), con promedios de 24 hrs (1 a 24 hrs del día).

Cuadro 2. Promedios mensuales de Radiación neta (Rn) para intervalos de tiempo de 24 hrs (1 a 24 hrs), calculados con los datos del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1999	188.505	223.436	298.891	338.115	388.855	322.869	350.370	345.777	299.457	207.362	196.469	172.841
2000	187.968	236.522	301.719	337.455	311.441	287.114	359.479	323.477	289.430	228.956	172.104	162.583
2001	172.926	203.805	297.974	312.005	348.085	329.986	330.515	302.054	261.406	241.666	180.833	153.587
2002	173.676	194.574	290.561	318.163	335.046	350.393	301.052	334.524	244.779	248.713	169.479	158.897
2003	166.071	198.199	281.002	267.769	347.358	320.190	311.231	306.508	229.465	236.839	186.300	169.621
2004	162.309	211.844	273.786	320.295	360.279	295.837	325.025	283.340	257.385	244.689	188.286	155.020
2005	175.215	172.175	276.652	302.615	339.406	354.431	311.622	292.365	285.596	232.375	183.102	148.309
2006	162.405	208.285	268.907	313.502	332.607	338.185	301.953	292.768	235.143	218.602	185.479	150.022
2007	160.686	194.334	265.056	296.399	334.897	293.480	290.536	299.553	256.145	255.706	189.182	149.162
2008	169.335	205.379	277.165	331.337	298.573	358.704	312.666	269.085	229.782	234.413	194.351	161.549
2009	176.560	212.629	280.793	318.440	299.024	344.826	353.533	328.419	207.909	238.003	178.713	157.912
2010	186.856	193.258	348.136	303.631	348.785	341.371	310.572	327.788	267.846	262.280	196.152	163.671
Media=	173.543	204.537	288.387	313.311	337.030	328.116	321.546	308.805	255.362	237.467	185.038	158.598
Sx=	9.620	15.632	21.345	18.690	24.504	23.624	21.516	22.134	26.321	14.478	8.373	7.537
Cv=	5.54%	7.64%	7.40%	5.97%	7.27%	7.20%	6.69%	7.17%	10.31%	6.10%	4.52%	4.75%

Sx = desviación estándar de la serie de datos

Cv = coeficiente de variación de los datos

Cuadro 3. Promedios mensuales de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) para intervalos de tiempo de 12 hrs (8 a 20 hrs), generados con información climatológica del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1999	100.131	113.929	151.594	186.586	214.076	155.756	161.284	174.216	141.734	97.046	93.268	82.292
2000	95.699	118.638	149.895	183.092	172.709	138.335	182.3	153.146	150.783	106.96	86.3	82.946
2001	82.814	109.018	148.78	164.034	179.441	178.5	177.475	154.681	124.166	142.113	94.786	84.775
2002	100.92	95.186	175.549	186.128	183.347	183.279	150.878	171.043	115.025	121.645	81.169	87.637
2003	82.206	109.696	165.884	177.002	217.005	182.861	140.447	143.407	97.93	103.464	88.703	77.748
2004	70.621	103.809	129.194	149.208	169.668	132.97	142.432	120.759	105.847	110.383	94.301	73.525
2005	81.626	78.838	135.473	152.567	193.114	199.79	154.422	133.219	134.628	100.494	90.793	76.008
2006	83.685	99.441	144.749	164.374	178.574	178.119	139.523	128.527	101.617	95.927	90.929	72.179
2007	75.126	97.772	131.195	152.584	166.787	145.226	125.693	128.893	112.513	121.139	94.239	97.5
2008	85.671	115.457	150.816	176.195	160.287	188.601	145.565	123.825	95.13	104.915	90.098	87.91
2009	88.775	108.311	146.673	171.899	154.252	182.479	174.501	162.235	87.184	106.583	83.809	77.407
2010	90.274	89.24	166.769	166.014	184.337	176.791	124.416	140.511	108.975	117.152	94.34	85.964
Media=	86.462	103.278	149.714	169.140	181.133	170.226	151.578	144.539	114.628	110.652	90.228	82.158
Sx=	8.868	11.189	13.620	12.621	18.497	20.626	18.348	17.594	18.771	12.526	4.296	6.919
Cv=	10.26%	10.83%	9.10%	7.46%	10.21%	12.12%	12.10%	12.17%	16.38%	11.32%	4.76%	8.42%

Sx = desviación estándar de la serie de datos

Cv = coeficiente de variación de los datos

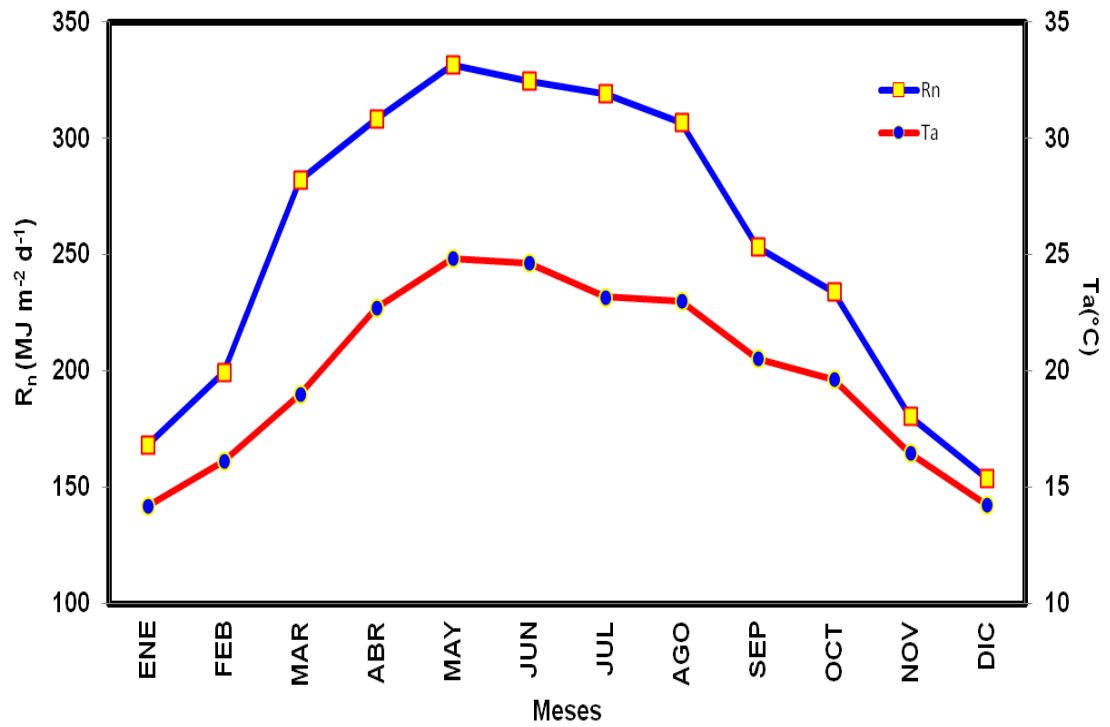


Figura 7.- Promedios mensuales (1999-2010) de Radiación neta (R_n) y Temperatura del aire (T_a), con promedios de 12 hrs (8 a 20 hrs del día).

Cuadro 4. Promedios mensuales de Radiación neta (Rn) para intervalos de tiempo de 12 hrs (8 a 20 hrs), calculados con los datos del observatorio Saltillo, Coahuila, (CNA), de 1999 a 2010.

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1999	179.627	215.771	290.171	337.462	377.212	319.785	347.295	341.543	295.722	204.773	189.488	165.484
2000	177.673	226.857	300.387	333.431	307.996	285.336	355.698	320.843	284.79	226.38	169.371	157.208
2001	169.691	199.634	292.015	303.903	342.465	324.915	327.012	299.266	258.242	233.617	175.571	149.733
2002	166.401	188.956	280.483	311.651	328.88	343.44	298.566	330.629	242.185	246.472	165.222	153.973
2003	161.005	193.369	271.783	262.642	338.25	315.743	309.32	304.38	228.959	233.83	182.814	167.728
2004	161.717	210.768	273.606	318.521	360.186	295.652	324.826	283.643	257.796	242.134	184.572	151.838
2005	171.618	170.103	271.527	297.888	330.735	350.044	308.859	291.03	281.93	230.497	177.206	143.17
2006	156.616	202.543	262.8	307.634	326.598	334.021	300.495	291.887	233.921	216.507	180.827	146.302
2007	157.631	189.753	260.413	291.566	329.579	291.044	289.627	299.133	255.011	250.274	185.539	143.559
2008	162.974	198.439	269.868	325.005	296.501	354.67	309.941	268.135	229.016	231.311	189.507	156.859
2009	171.899	206.949	274.811	311.456	296.16	341.456	351.189	325.96	207.196	235.392	175.226	154.682
2010	181.982	189.568	338.02	299.565	344.516	338.298	309.622	325.746	266.488	257.309	189.868	157.117
Media=	168.236	199.393	282.157	308.394	331.590	324.534	319.371	306.850	253.438	234.041	180.434	153.971
Sx=	8.206	14.179	20.338	19.270	22.929	22.499	20.955	21.059	25.231	13.753	7.731	7.402
Cv=	4.88%	7.11%	7.21%	6.25%	6.91%	6.93%	6.56%	6.86%	9.96%	5.88%	4.28%	4.81%

Sx = desviación estándar de la serie de datos

Cv = coeficiente de variación de los datos

4.2 Evapotranspiración de referencia promedio mensual con datos de 12 y 24 hrs, durante el tiempo del registro.

En el Cuadro 5, se observa que la evapotranspiración de referencia promedio mensual para todos los meses del año fue estadísticamente mayor con los datos promedio de 12hrs, que con los promedios de 24 hrs (Wilcoxon, $\alpha = 0.05$; Cuadro 6). Corroborando la hipótesis establecida. Esto ocurrió porque al promediar los datos de temperatura del aire, déficit de presión de vapor y velocidad del viento para periodos de 12 hrs (8 a 20 hrs del día), resultó en promedios más altos que los que se obtuvieron con los promedios de 24 hrs (1 a 24 hrs del día), ya que durante la noche, estos valores son menores. Y la tasa de evapotranspiración de referencia es directamente proporcional a la temperatura del aire, déficit de presión de vapor y velocidad del viento (Allen *et al.*, 1998).

Estudios previos reportan que el método FAO-Penman-Monteith, tiende a subestimar la tasa diaria de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) a valores elevados de evapotranspiración y sobrestimar a valores bajos (Howell *et al.*, 1998; Rana *et al.*, 1997). Estudios lisimétricos realizados por Steduto *et al.* (1996) mostraron que el modelo FAO Penman-Monteith subestimó la ET_{ref} entre un 3 y 5% en estimaciones diarias y horarias bajo condiciones de clima mediterráneo.

Para los promedios de 12 y 24 hrs, la mayor tasa de evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) se dio en el mes de mayo. Para promedios de 12 hrs, ET_{ref} fue 20.794 mm; 12.97% mayor que la obtenida con promedios de 24 hrs (Cuadro 5). La

tasa menor de ET_{ref} se observó en diciembre y fue 7.407 mm mayor con promedios de 12 hrs, respecto a los promedios de 24 hrs.

La ET_{ref} total anual para promedios de 12 hrs fue 1 553.73 mm y para promedios de 24 hrs 1 397.18 mm, esto resulto en una diferencia de 156.55 mm (11.20%) mayor con datos promedio de 12 hrs. Esto implicaría un déficit de 156.55 mm para el riego de cultivos perenes al utilizar promedios de 24 hrs.

Cuadro 5. Promedios mensuales de evapotranspiración de referencia para promedios de 12 (8 a 20 hrs) y 24 hrs (1 a 24 hrs) de los datos climatológicos, y diferencias mensuales correspondientes.

MES	ET_{ref_24hrs} (mm)	ET_{ref_12hrs} (mm)	DIF (mm)	DIF (%)
ENE	78.280	86.462	8.182	10.45
FEB	92.907	103.278	10.371	11.16
MAR	133.263	149.714	16.451	12.34
ABR	150.985	169.140	18.156	12.02
MAY	160.339	181.133	20.794	12.97
JUN	150.237	170.226	19.988	13.30
JUL	138.468	151.578	13.110	9.47
AGO	131.351	144.539	13.188	10.04
SEP	104.315	114.628	10.312	9.89
OCT	100.461	110.652	10.191	10.14
NOV	81.826	90.228	8.402	10.27
DIC	74.751	82.158	7.407	9.91
TOTALES	1397.184	1553.735	156.551	11.20

Cuadro 6. Resultados de la prueba de Wilcoxon para los valores de la evapotranspiración de referencia mensual obtenida con datos climatológicos promedio de 12 y 24 hrs.

Wilcoxon Signed Ranks Test

		Ranks		
		N	Mean Rank	Sum of Ranks
ETref_12h - ETref_24h	Negative Ranks	0 ^a	.00	.00
	Positive Ranks	12 ^b	6.50	78.00
	Ties	0 ^c		
	Total	12		

a. ETref_12h < ETref_24h

b. ETref_12h > ETref_24h

c. ETref_12h = ETref_24h

Test Statistics^b

	ETref_12h - ETref_24h
Z	-3.059 ^a
Asymp. Sig. (2-tailed)	.002

a. Based on negative ranks.

b. Wilcoxon Signed Ranks Test

El Cuadro 7, presenta una comparación entre la evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) calculada para el ciclo primavera-verano (marzo-agosto) y el ciclo otoño-invierno (septiembre-febrero), para datos climatológicos promedio de 12 y 24 hrs. Nótese que par el ciclo primavera verano se tendría un déficit de 101.687 mm de riego al calcular la ET_{ref} con datos promedio de 24 hrs. Mientras que para el ciclo

otoño-invierno, el déficit sería de 54.475 mm con los datos promedio de 24 hrs. Estas subestimaciones de la ET_{ref} , causarían un estrés hídrico a la planta, que se podría reflejar en bajos rendimientos de los cultivos regados (Stockle *et al.*, 1991).

Cuadro 7. Evapotranspiración de referencia (ET_{ref}) calculada para el ciclo primavera-verano (marzo-agosto) y el ciclo otoño-invierno (septiembre-febrero), con promedios climatológicos de 24 y 12 hrs.

CICLO	ET_{ref_24hrs} (mm)	ET_{ref_12hrs} (mm)	DIF (mm)	DIF (%)
P-V (Mar-Ago)	864.643	966.330	101.687	11.76%
O-I (Sep-Feb)	532.541	587.405	54.864	10.30%

V. CONCLUSIONES

Para todos los meses del año, la evapotranspiración de referencia calculada con datos climatológicos promedio de 12 hrs fue mayor que la obtenida con datos promedio de 24 hrs, corroborando la hipótesis establecida. La evapotranspiración de referencia total anual fue 11.20% mayor al utilizar datos climatológicos promedio de 12 hrs, con relación a la obtenida con datos promedio de 24 hrs.

La evapotranspiración de referencia calculada con datos climatológicos promedio de 12 y 24 hrs fue mayor en el mes de mayo, debido a un valor mayor de la radiación neta y la temperatura del aire en esta localidad geográfica.

VI. LITERATURA CITADA

- Aguilera, C. y R. Martínez E. 1996. Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 256 p.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., y Pereira, L.S. 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin. 43(2):1-34.
- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., y Perrier, A. 1994b. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43 (2):35-92.
- Allen, R.G; Pereira, L.S; Raes, D. y Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Rome. 301 p.
- Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio Riego y Drenaje, FAO-56. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y Alimentación. Roma. 323 p.
- Burman, R. D., Nixon, P.R., Wright J.L. y Prutt, W.O. 1983. Water requirements. In. design and operation of farm irrigation systems. ASAE Monograph No. 3, Edited by M. E. Jensen, St. Joseph. Michigan 49085. 829 p.

Burman, R. y Pochop, L.O. 1994. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Developments in Atmospheric Science, 22. 302 p.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24(Rev. 1). FAO. Roma. Italia. 144 p.

Droogers, P. y Allen, R.G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and Drainage Systems, 16:33-45.

Domingo, F., Villagarcía, L. y Were, A. 2002. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. Ecosistemas 2003/1. (URL: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8959/1/ECO_12%281%29_09.pdf) consultado en enero de 2012.

De Santa, F.M., López, P. y Calera, A. 2005. Agua y agronomía. 606 p.

Fernández, M; Bonachela, S; Orgaz, F; Thompson, R; López, J; Granados M; Gallardo, M. Fereres, E. 2010. Measurement and estimation of plastic

greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. Irrigation Science. DOI 10.1007/s00271-010-0210-z. 28(6):497-509.

Guevara, J.M. 2006. La formula de Penman-Monteith 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ET_0 . Terra 22(31):31-72.

Hargreaves, H.G. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. Jour. Irrig. and drain. Eng. ASCE. 120(6):1132-1139.

Howell, T.A.; Evett, S.R.; Schneider, A.D.; Todd, R.W. y Tolk, J.A. 1998. Evapotranspiration of irrigated fescue grass in a semi-arid environment. ASAE Paper No. 982117, 23 p.

Jensen, M.E., Burman, R.D., y Allen, R.G. (ed.). 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70., Am. Soc. Civil Engrs., New York, Estados Unidos de América, 360 p.

Jarvis, P.G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Phil. Trans. Roy. Soc. B, 273:593-610.

- Ludlow, M.M. 1970. Effect of oxygen concentration on leaf photosynthesis and resistances to carbon dioxide diffusion. *Plant* 91:285-290.
- Lopez, J.L., Hess, T.M. y White, M. 2009. Estimation of reference evapotranspiration in a mountainous Mediterranean site using the Penman-Monteith equation with limited meteorological Data. *Pirineos*, 164:7-31
- Lecina, S. y Martínez, A. 2000. Evaluación lisimétricas de la evapotranspiración de referencia semihoraria calculada con el método FAO Penman-Monteith. Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC). Zaragoza. Apartado 202.50.080
- Mckenney, M.S. y Rosenberg, N.J. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64:81-110.
- Monteith, J.L., 1965. *Evaporation and Environment*. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19:205-234.
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Londres*, A193:120-146.

- Pire, R. y Rodríguez, R. 2007. Evapotranspiración referencial (ET_0) medida vs estimada en Tarabana ($10^{\circ} 01'LN$), Estado de Lara, Venezuela. Rev. Unell. Cienc. Tec. 25:58-66.
- Rana, G., Katerji, N., Mastrorilli, M., El Moujabber, M. y Brisson, N. 1997. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. Agric. For. Meteorol. 86:215-224.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. y Verma, S.B. 1983. Microclimate: the biological environment. Wiley, New York. 495 p.
- Sánchez, M.M. y Carvacho, B.L. 2011. Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 50: 171-186.
- Sánchez, M. y Chuvieco, E. 2000. Estimación de evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_0 , a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Revista de Teledetección 14. 10 p.
- Sánchez, M.I. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geoforma ediciones, 35 p.

- Sánchez, M.I, Martínez, A.L., Del Amor, F. y López, F. 1995. Estudio de modelos físicos de evapotranspiración de referencia gramíneas para la región de Murcia. *Anales de biología*, 20(9):87-92.
- Szeicz, G. y Long, I. 1969. Surface resistance of crop canopies. *Water Resources Research* 5:622-633.
- Sellers, P.J., Dickinson, R.E., Randall, D.A., Betts, A.K., Hall, F.G., Berry, J.A., Collatz, G.J., Denning, A.S., Mooney, H.A., Nobre, C.A., Sato, N., Field, C.B. y Henderson, S.A. 1997. Modelling the exchanges of energy, water and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275:502-509.
- Stefano, C; Ferro, V. 1997. Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semi-arid mediterranean areas. *J. Agric. Engng (Rev)* 68:189-199.
- Steduto, P., Calciandro, A., Rubino, P., Ben Mechlia, N., Masmoudi, M., Martínez-Cob, A., Jaci, J.M., Rana, G., Mastrorilli, M., El Mourid, M., Karrou, M., Kanber, R., Kirda, C., El-Quosi, D., El-Askari, K., Ait Ali, M., Zareb, D. y Snyder, R.L. 1996. Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates in the Mediterranean region. In Camp, C.R., Sadler, E.J., y Yoder, R.E (eds.): *Proceedings of the international conference on Evapotranspiration and irrigation scheduling*, 3-6 November the 1996, San Antonio, TX, pp. 357-364.

- Stewart, J.B. 1989. On the use of the Penman-Monteith equation for determining areal evapotranspiration. In: Black TA, Spittle house DL, Novak MD, and Price DT (eds) Estimation of Areal Evapotranspiration, IAHS 177:3-12.
- Stockle, C.O., James G.L., Basset D.L., Saxton E.K. 1991. Effect of evapotranspiration Under prediction on Irrigation Scheduling and Yield of Corn: a Simulation Study. *J. Agricultural Water Management*, 19(2):167-179.
- Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B. y Frame. K. 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1:73-84.
- Tijerina, Ch.L. 1992. Uso eficiente del agua en unidades de riego para el desarrollo rural. Diplomado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Trezza, R. Pacheco, Y. Suárez, Y. Núñez, A. y Umbría, I. 2008. Programación del riego en caña de azúcar en una zona semiárida del estado Lara, Venezuela, Utilizando la metodología FAO-56. *Bioagro*, 20(1):21-27.
- Trezza, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar? *Bioagro*, 20(2):89-95.

Valenzuela, A. y Ferreira, V. 1985. Variación de la evapotranspiración potencial en Chile. *Agro-Ciencia*, 1(1):15-21.

Villaman, R. Tijerina, L, Quevedo, A. y Crespo, G. 2001. Comparación de algunos métodos micro meteorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. *Terra* 19(3):281-291.

Walter I.A., Allen R.G., Elliot R., Jensen M.E., Iten fisu D., Mecham B., Howell T.A., Snyder R., Brown P., Echings S., Spof ford T., Hatten dorf M., Cuenca R.H., Wright J.L., Martin D. 2000. ASCE´s Standardized Reference Evapotranspiration Equation. *Watershed Management and Operation Management*. ASCE Conf. Proc. Doi: 10. 1061/40499. 126 p.

Wilson, E. M. (1990). *Engineering Hydrology*. Macmillan Press Ltd. 360 p.

Xu, C.Y. y Singh, V.P. 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 13:305-319.