



COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UNA ZONA ÁRIDA CITRÍCOLA DEL NOROESTE DE MEXICO

[COMPARISON OF EVAPOTRANSPIRATION METHODS FOR AN ARID CITRUS PRODUCTION ZONE IN NORTHWEST MEXICO]

J. Navejas-Jiménez^{1,2*}, A. Nieto-Garibay², H. C. Fraga-Palomino²,
E. O. Rueda-Puente³ y N. Y. Ávila-Serrano⁴

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Carr. Transpeninsular Km 208. A. P. 127, CD. Constitución Baja California Sur, CP 23600, México. Email: navejas.jesus@inifap.gob.mx.

² Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. México.

³ Universidad de Sonora. Campus Santa Ana. Santa Ana, Son., México.

⁴ Universidad del Mar. Campus Puerto Escondido, Oax., México.

*Corresponding Author

RESUMEN

El agua es indispensable para la existencia y evolución de los ecosistemas vegetales y animales. Es un recurso y factor que interactúa con las condiciones climáticas, geológicas y edafológicas; en consecuencia, la cantidad presente en la atmósfera y en el suelo repercute en los ecosistemas. El agua es parte esencial del protoplasma vegetal y constituye un elemento primordial en la fotosíntesis. La cantidad, frecuencia y distribución de las precipitaciones atmosféricas revisten importancia ecofisiológica, en las diversas fases de desarrollo vegetativo. En la zona árida de Baja California Sur la precipitación media anual es de 175 mm, irregularmente distribuidos a lo largo del año, con temperaturas que oscilan entre 5 y 40°C. El naranjo enfrenta serios problemas para adaptarse a las condiciones agroclimáticas prevalecientes, principalmente a la alta demanda evapotranspirativa. Desde el enfoque de la irrigación, la estimación de la ET_{real} es primordial para la determinación de la frecuencia de aplicación y la cantidad de agua a aplicar. Cálculos oportunos de la ET_{real} cuantifican la demanda del recurso agua y son fundamentales para planificar el uso de la disponibilidad, y en consecuencia para determinar las dimensiones de las obras hidráulicas. La finalidad del presente estudio fue determinar la demanda de agua mediante la aplicación de métodos para estimar la evapotranspiración del naranjo, en la zona árida citrícola de Baja California Sur, México. La demanda de agua promedio se determinó en 6.8 y 5.2 mm día⁻¹, mediante métodos indirectos y directos de estimación de la ET respectivamente, con una diferencia de 30.8% entre métodos. Las desviaciones estándar fueron 0.05 y 0.03, en tanto que los coeficientes de variación fueron 7.35 y 5.77%, en el mismo orden. El requerimiento de agua neto estimado por ha y por día fue de 25 y 19 m³, por semana de 175 y 134 m³ y mensual de 751 y 574 m³, mediante la aplicación de métodos indirectos y

directos respectivamente. Los métodos que consideran además de los parámetros climatológicos, las características de suelo y la respuesta de la planta son modelos integradores, además de ser más representativos del agroecosistema. Por su parte, el uso de agua fundamentado en la aplicación de métodos indirectos que frecuentemente sobreestiman la ET, implica un deterioro gradual y eventual agotamiento del acuífero que sustenta la producción.

Palabras clave: demanda de agua; evapotranspiración real; naranjo; Citrus; zona árida.

SUMMARY

Water is essential to current and evolving ecosystem of plants and animals. It is a resource and a factor which interacts with the climatic and soil conditions, so its quantity in the atmosphere and soil has a direct impact on the ecosystems. Water is the essential part of protoplasm plant and is primordial for the photosynthesis process. The amount, frequency and distribution of precipitation are relevant because of its relationship with the stages of vegetative growth. In the arid zone of Baja California Sur, the average annual rainfall is 175 mm, unevenly distributed throughout the year and the temperature varies from 5 to 40 °C. Orange orchards face serious problems in adapting to the prevailing agro-climatic conditions, mainly to the evapotranspirative demand. The actual evapotranspiration (ET_{real}) is the process by which water is evaporated from the soil and transpired by plants. From the water use viewpoint, the estimation of ET_{real} is relevant for the application, frequency and quantity of applied irrigations. The estimates of ET_{real} allow to quantify the demand of the water resources and to determine the dimensions of the hydraulic irrigation-related works. The purpose of this study was to determine the water demand by means of methods to estimate the evapotranspiration of orange, in the

arid citrus production zone of Baja California Sur, Mexico. For orange trees, water demand averaged 6.8 and 5.2 mm día⁻¹, with indirect and direct ET methods, respectively; thus, a difference of 30.8% was observed between them. The standard deviations were 0.05 and 0.03, and the variation coefficients 7.35 and 5.77% in the same order. The net requirement of water per ha was 25 and 19 m³ per day, 175 and 134 m³ per week, and accordingly 751 and 574 m³ monthly, with indirect and direct ET methods, respectively. Those methods which consider climatological parameters, the

INTRODUCCIÓN

De todos los recursos explotados por el hombre, el agua es uno de los que revisten la mayor importancia. El agua es indispensable para la existencia y evolución de los ecosistemas vegetales y animales. Es un factor que interactúa con las condiciones climáticas y edafológicas, por lo que su cantidad en la atmósfera y en el suelo ejercen repercusiones directas en el ecosistema. El agua es la parte esencial del protoplasma vegetal y primordial en el proceso de fotosíntesis, además de ser el medio indispensable para el suministro de nutrientes. La cantidad, frecuencia y distribución de las precipitaciones atmosféricas son importantes, por su relación con las diversas fases de desarrollo vegetativo.

En México, las sequías recurrentes suceden en una porción importante del territorio nacional, en tanto que fuertes avenidas provocadas por eventos extremos de precipitación, ocurren en otra parte de la República, eventos que son indicativos de la variabilidad climática (Sánchez-Cohen, 2005). Los impactos climáticos afectan a la agricultura y ganadería nacional, ya que la superficie de riego estimada en 6 millones de ha, además de las 14 millones de ha existentes bajo condiciones de temporal (SAGAR, 1997), se consideran bajo riesgo por la incertidumbre climática. Además, al problema de disponibilidad de agua se añade la salinidad de los suelos en alrededor de 400 mil ha afectadas con esta condición (Sánchez-Cohen, 2005).

En la zona árida de Baja California Sur, la precipitación media anual es de 175 mm, irregularmente distribuidos a lo largo del año, con temperaturas que oscilan de 5 a 40°C. El naranjo enfrenta serios problemas para adaptarse a las condiciones agroclimáticas áridas prevaletentes. El rendimiento medio del naranjo en las zonas productoras del Estado de B.C.S. es bajo (10 t ha⁻¹) y en consecuencia, con una estrecha rentabilidad. De un total de 1976 ha, 1723 ha son del cultivar Valencia tardía, cuyo potencial puede alcanzar un nivel de 50 t ha⁻¹ (González y González, 2002). Ante esta variabilidad, es evidente que el principal criterio de

soil characteristics and the response of plants are integrating models, being more representative of the agro-ecosystem. The use of water based on the application of methods which overestimate the ET implies a gradual deterioration and eventual depletion of the aquifer that sustains the production.

Keywords: water demand; real evapotranspiration; orange; Citrus, arid zone.

productividad debe considerar el desarrollo y las características fenotípicas de la planta, así como el ambiente que rodea al cultivo. En este sentido, cabe recalcar que las condiciones adecuadas de factores externos y de estado nutricional mejoran la producción, en cantidad y calidad (Tucker *et al.*, 1995).

La tecnología inadecuada en la programación del riego y la baja eficiencia de los sistemas de riego han degradado paulatinamente los recursos naturales, la productividad del suelo y la disponibilidad del agua. Por lo que la NOM-004-CONAGUA-1996, especifica la protección de acuíferos en el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre general. El escenario sustentable considera la contención del aumento en la demanda de agua, con la finalidad de revertir la sobreexplotación de acuíferos (CONAGUA, 2006). Por tanto, la determinación del consumo de agua actual del cultivo o evapotranspiración es necesaria para el diseño, construcción y operación de sistemas de riego (Villanueva-Díaz *et al.*, 2001).

Los datos climáticos son de suma relevancia para una planeación agrícola mas precisa. Su aplicación es posible cuando se cuenta con información de los coeficientes de ajuste por desarrollo de los diferentes cultivos, información que frecuentemente se toma de referencias de otros sitios y latitudes, aunque comúnmente se pierde precisión en las estimaciones, por lo que no se garantiza la eficiencia deseable en el uso del agua. En zonas semiáridas y subtropicales secas el crecimiento económico y poblacional, así como la globalización del comercio, han incrementado gradualmente la presión sobre la capacidad de carga de los ecosistemas, la cual es limitada. Aún cuando la ecología y naturaleza de los ecosistemas deben estar vinculadas en todo grupo social, no se consideran integralmente en la planeación y uso de los recursos naturales, por lo que no se garantiza el desarrollo sustentable. Las actividades que afectan la cubierta vegetal y estabilidad de los ecosistemas son el monocultivo, el sobrepastoreo, la deforestación y el deficiente manejo del agua de riego. En este sentido, la pérdida de fertilidad del suelo degrada su capacidad de

sustento de la flora y la fauna ocasionando procesos como la erosión, desertificación, abatimiento de la productividad y la pobreza (Villalobos *et al.*, 2005). El recurso agua dulce es un componente esencial de la hidrosfera de la Tierra y parte indispensable de todos los ecosistemas terrestres. El agua dulce se caracteriza por su dinámica en el ciclo hidrológico, que incluye las inundaciones y sequías, cuyas consecuencias en algunas regiones han adquirido dimensiones extremas y dramáticas durante los últimos años. Dentro de los procesos del ciclo hidrológico que se han intensificado por la expansión de la agricultura, destaca enfáticamente la evapotranspiración, simbolizada comúnmente como ET o Et (Rana y Katerji, 2000). En el contexto del ciclo hidrológico, se denomina evapotranspiración a la evaporación de una superficie de suelo cubierta con vegetales, adicionada a la transpiración de dichos vegetales. La transpiración del agua por las plantas se debe a la necesidad hídrica que tienen las mismas para incorporarla a su estructura celular, además de utilizarla como elemento de transporte de alimentos, de eliminación de residuos y de estabilización térmica (enfriamiento relativo) (Casa *et al.*, 2000). La circulación del agua en la planta no es un circuito cerrado, sino un flujo de circulación abierta. El agua penetra por la raíz y circula por la planta, para que una proporción elevada de ella se evapore por las hojas a través de los estomas. La transpiración depende principalmente de factores agrobiológicos, edafo-ambientales y climáticos: (a) tipo de planta, (b) ciclo de crecimiento de la planta (inicial, vegetativo, medio, maduro), (c) tipo de suelo y humedad disponible en el suelo a la profundidad de la raíz, (d) insolación, temperatura, viento, humedad de la atmósfera y otros factores ambientales (Alves *et al.*, 1998).

Existe una clara diferencia entre la cantidad de agua que la planta puede absorber del suelo (Q_p) y la cantidad de agua (Q_l) que la planta transpira. Q_p depende del tipo de suelo y de las condiciones de humedad, así como del tipo y condición fisiológica de la planta, en tanto que Q_l depende de las condiciones de insolación, humedad y viento, así como de las características de la propia planta. Si $Q_l > Q_p$, la planta se marchita o tiene que variar sus condiciones de desarrollo. Si $Q_l = Q_p$, la planta tiene suficiente circulación de agua y se desarrolla satisfactoriamente. Por último, los excesos de circulación de agua, con $Q_l < Q_p$, pueden producir fenómenos contrarios al desarrollo, como el estancamiento y nulo crecimiento vegetativo (Beyazgul *et al.*, 2000).

Una forma de cuantificar la demanda de agua de los cultivos, producto de los cambios atmosféricos, es mediante la estimación de la evapotranspiración (ET), la cual incluye la cantidad de agua usada por el cultivo en la transpiración y la evaporación directa desde la superficie del suelo. Por lo anterior, la

evapotranspiración es la cantidad de agua perdida por el cultivo que debe reponerse mediante el riego. La ET se mide o estima comúnmente en mm día^{-1} o mm mes^{-1} (Allen *et al.*, 1989).

La cuantificación de la ETo (evapotranspiración potencial o de referencia) se puede realizar mediante métodos directos o indirectos. Los métodos indirectos más comunes para determinar la evapotranspiración de referencia son: Cubeta o tanque evaporímetro (Pereira *et al.*, 1995), Blanney-Criddle modificado por FAO, Hargreaves., Penman-FAO, Penman-Monteith y otros (Allen *et al.*, 1999). Los estudios comparativos entre los diferentes métodos llevados a cabo por FAO, se resumen de la siguiente manera (Doorenbos y Pruitt, 1977):

a) Todos los métodos necesitan calibración *in situ* mediante lisímetros y el apoyo de técnicas de medición indirecta, incluyendo los métodos micro-meteorológicos (relación de Bowen, el método del perfil, el método del flujo de turbulencia, los métodos aerodinámicos combinados, el método sensorial remoto, otros).

b) Los métodos de radiación muestran resultados aceptables en regiones donde el término aerodinámico es relativamente pequeño, pero la determinación en condiciones áridas tiende a subestimar la evapotranspiración de referencia ETo.

c) Los métodos que utilizan el tanque de evapotranspiración claramente reflejan imprecisiones en la predicción de la evapotranspiración del cultivo a partir de la evaporación de agua al aire libre. Los métodos son susceptibles a las condiciones microclimáticas bajo las cuales se encuentran los tanques y las condiciones de manejo y mantenimiento de la estación (Cohen *et al.*, 2002).

d) La relativa precisión y validez de la aproximación del modelo de Penman-Monteith aplicado en climas áridos y húmedos ha sido señalado en los estudios de la American Society of Civil Engineers (ASCE) y en estudios europeos (Ortega-Farías y Cuenca, 1998).

El análisis de la aplicación de diferentes métodos de cálculo revela la necesidad de formular un método estándar para el cómputo de ETo, con un procedimiento de adquisición de datos accesible. En el cálculo de la evapotranspiración de referencia frecuentemente se aplica el modelo de Penman-Monteith (Rana y Katerji, 2000), debido al rigor en su planteamiento, a pesar de varias simplificaciones de su planteamiento teórico. Es un método con alta precisión en la predicción de ETo en una amplia gama de localidades y climas, aunque con poca factibilidad de aplicación en situaciones de escasez o ausencia de datos. Por su aplicación generalizada, es uno de los

métodos más utilizados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Además, es elegible según el tipo de estaciones con el que frecuentemente se cuenta, aunque se requiere disponer de los datos necesarios para aplicar este método (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Evapotranspiración de referencia.

Con la finalidad de valorar la capacidad máxima de evaporación y transpiración de un suelo con determinadas condiciones atmosféricas y de radiación, se define el concepto de evapotranspiración de referencia como la cantidad de agua transpirada por unidad de tiempo, al estar establecido en el suelo un cultivo herbáceo uniforme de 30 a 50 cm de altura (alfalfa) y siempre con suficiente agua. En dichas condiciones se produce el máximo de transpiración y coincide con las condiciones óptimas de crecimiento de las plantas (FAO, 1990). Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos sembrados y la evapotranspiración de referencia, pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo (K_c) o separadas en dos coeficientes: un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e), por lo que $K_c = K_{cb} + K_e$. El procedimiento a seguir dependerá del propósito de los cálculos, la exactitud requerida y la información disponible (Allen *et al.*, 1999, 2005). El cálculo de la evapotranspiración de un cultivo supone que no existen limitaciones de ningún tipo en el desarrollo de los mismos y además que no existe ninguna limitación debida a estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad (Cohen *et al.*, 2002). Debido a las variaciones en las características propias del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha. Los efectos combinados, tanto de la transpiración del cultivo como de la evaporación del suelo, se integran en dicho coeficiente único del cultivo. De esta manera, el coeficiente K_c incorpora las características del cultivo

y los efectos promedios de la evaporación en el suelo, constituyendo una excelente herramienta para la planificación del riego y la programación de calendarios de riego en periodos mayores a un día.

La metodología de zonificación agroecológica de la FAO (1981) requiere de información de clima; ello incluye la evapotranspiración de referencia la cual se calcula mediante la evaporación y otros métodos, considerando los períodos de crecimiento para cada etapa fenológica. El clima es un fenómeno natural importante en la adaptación y desarrollo de los cultivos; las variables climáticas más importantes que influyen en la adaptación de los cultivos son la temperatura, precipitación y evaporación, entre otras. En México, la mayoría de las estaciones meteorológicas reportan solamente la temperatura y la precipitación, en tanto que son escasas las que reportan el dato de evaporación, variable que es utilizada en la zonificación de cultivos. Para lo anterior es importante estimar el consumo de agua de los cultivos y también para el cálculo de los calendarios de riego y balance hídrico (Sotelo-R. *et al.*, 2000).

La mayoría de las redes meteorológicas de estaciones automatizadas se localizan en áreas donde la conservación del agua es de enorme interés; el principal propósito que justifica su instalación es proporcionar a los agricultores información de la evapotranspiración de referencia (ETo) para usarla con fines de calendarización de los riegos (Grageda *et al.*, 2002). Existen evidencias en California USA, de que el mayor uso de la ETo para la programación del riego ocurre en frutales y pastos. En virtud de que los especialistas en irrigación diseñan y operan principalmente riegos presurizados en áreas tecnificadas, de ahí el interés en aplicar esquemas y programas de calendarización del riego (Lage *et al.*, 2003).

Cuadro 1. Evapotranspiración anual estimada con el método de Blanney-Criddle (UC Davis, 2007; FAO, 1990), desviación en referencia a naranjo y K_c aplicables a cultivos frutales en B.C.S.

Cultivo	Evapotranspiración anual (cm)	Desviación (%)	Constante de Cultivo K_c
Mango	145	22.9	0.80-0.85
Higo	110	-6.8	0.65-0.80
Dátil	110	-6.8	0.65-0.85
Aguacate	145	-22.9	0.70-0.80
Guayaba	110	-6.8	0.65-0.80
Papaya	135	14.4	0.75-0.80
Litchi	145	22.9	0.80-0.85
Vid	127	7.6	0.65-0.75
Naranjo	118	-	0.65-0.90

La finalidad del presente trabajo fue estimar la evapotranspiración en una zona árida del noroeste de México empleando modelos convencionales, el método de Blanney-Criddle y el del evaporímetro de tanque, y definir un modelo alternativo de estimación de la evapotranspiración de referencia en un suelo yermosol de zona árida, en función de la temperatura máxima y radiación solar neta, aplicado al cultivo del naranjo en la zona semiárida productora de Baja California Sur. Asimismo, se persigue comparar las tendencias de las estimaciones de la evapotranspiración y su equivalencia en demanda de agua por unidad de superficie, así como el beneficio ambiental sobre el manejo del recurso agua invertido en el sostenimiento del agroecosistema del naranjo, en la zona productora mencionada.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste CIBNOR en La Paz, Baja California Sur y en el Sitio Experimental Valle de Santo Domingo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), situado en ciudad Constitución, B.C.S., en el noroeste de México. El agroecosistema de naranjo en estudio se localiza en la cuenca hidroagrícola de La Paz, B.C.S.; el clima de la zona de estudio es de tipo BW(h')hw(e), seco desértico cálido, con temperatura media anual mayor a 22 °C y precipitación promedio anual de 184 mm con lluvias predominantes en verano (García, 1988; Medina *et al.*, 1998; Ruiz *et al.*, 2006). El suelo representativo que sustenta el agroecosistema de naranjo se clasifica como Yermosol haplico (INEGI, 1994), de textura areno-migajosa, con 75% de arena, 15% de limo y 10% de arcilla; el contenido promedio de materia orgánica es de aproximadamente 0.4%.

El estudio se realizó durante los años 2006 y 2007, para lo cual se utilizaron registros de estaciones meteorológicas automatizadas ubicadas en la cuenca de La Paz, B.C.S. Los datos climatológicos disponibles incluyeron la temperatura, horas luz, velocidad del viento y evaporación; en parcelas de árboles adultos se realizaron mediciones directas de la humedad del suelo mediante el método gravimétrico, calculando el contenido de humedad en base a peso y volumen; la respuesta del naranjo al manejo hídrico se analizó en sus etapas fenológico-productivas.

Calculo de la evapotranspiración de referencia

Entre los métodos más utilizados destaca el Método de Blanney-Criddle, cuya fórmula es ampliamente aplicable en zonas áridas (FAO, 1990):

$$ET_o = p \cdot (0.46 \cdot T + 8.13) \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

$p = 100 \cdot (\text{n}^\circ \text{ horas luz al día} / \text{n}^\circ \text{ horas luz al año})$; T es la temperatura en °C, y ET_o es la evapotranspiración diaria en mm.

El cálculo de la evapotranspiración a partir de la evaporación libre (datos de evaporímetro de tanque) constituye un método práctico, siempre y cuando se utilice el adecuado coeficiente de ajuste (Malek, 1987; Lage *et al.*, 2003). Para el estudio del balance del agua en agroecosistemas, el concepto de ET_o substituye al término "ET potencial" que se utilizó frecuentemente en el pasado pero que carecía de una definición clara; para dicho efecto se han propuesto numerosos métodos de cálculo de la ET_o . La elección de un método depende principalmente de los datos disponibles. En algunos casos se dispone de datos medidos de ET_o en un lisímetro de hierba o matorral. En otros casos se dispone de tanque de evaporación o de datos meteorológicos que permiten utilizar alguna fórmula empírica. De manera generalizada, la ET de referencia (mm día^{-1}) se calcula mediante la ecuación de Penman-Monteith adaptada a una pradera de gramíneas (Doorenbos y Pruitt, 1977):

$$ET_o = \frac{\Delta R_n + 0.499 DPV U}{2.45 [\Delta + 0.06734 (1 + 0.332 U)]} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Donde:

ET_o es la evapotranspiración de referencia del cultivo, en mm día^{-1} , R_n es la radiación neta en MJ m^{-2} , DPV es el déficit de presión de vapor en el aire en kPa, U es la velocidad del viento a 2 m de altura en m s^{-1} y Δ es la pendiente correspondiente a la tasa de incremento observada.

Evapotranspiración del cultivo

La ET en ausencia de déficit hídrico se estima comúnmente como el producto de la evapotranspiración de referencia por la constante K_c del cultivo (FAO, 1990):

$$ET = K_c \cdot ET_o \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Donde:

K_c es el denominado coeficiente de cultivo que depende de factores relacionados con el cultivo (área foliar, rugosidad y otros) y ET_o es la ET de referencia, la cual es función de variables climáticas (radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento).

La expresión anterior (Ecuación 3) únicamente es válida mientras no se produce un estrés hídrico suficiente para ejercer una reducción en ET, lo que

ocurre normalmente cuando se ha agotado entre 70 y 80% del agua extraíble del suelo. Para el caso del naranjo, $K_c=0.9$ para la mayoría de las etapas de crecimiento, incluyendo la etapa como árbol adulto correspondiente a cosecha (Cuadro 1) (UC-Davis, 2007; Yang *et al.*, 2003). En el contexto de la determinación de la demanda de agua de cultivos en agroecosistemas, el método habitual de cálculo de la ET consiste en calcular la E_{To} en función de datos meteorológicos, ajustándola con el correspondiente K_c , variable con el estado de desarrollo del cultivo (Villanueva-Díaz *et al.*, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observa la tendencia de las temperaturas (máxima, media y mínima) y de la radiación solar en el Valle de La Paz, Baja California Sur; junio y julio son los meses con mayor estrés hídrico y térmico, en tanto que la temperatura tiende a incrementarse hacia el mes de agosto. Por la combinación de factores hidro-climáticos, la mayor demanda evaporativa se presenta en el período de mayo a septiembre, con una menor demanda en el período invernal (noviembre a marzo). Con los ajustes numéricos realizados (análisis de regresión simple y múltiple), se obtuvo un modelo térmico-irradiacional para el cálculo de la evapotranspiración de referencia a partir de dos variables independientes, la temperatura máxima y la radiación solar extraterrestre. Las estimaciones con los métodos ensayados en dos períodos contrastantes, de enero a junio (período seco) y de julio a diciembre (período semi-seco), fueron comparadas y presentaron una elevada correlación, mayor a 90 y 95%, en cada caso respectivo. Para árboles adultos de naranjo en la región productora bajo estudio, la E_{To} media mensual fue de 157 mm; cabe mencionar que los valores de E_{To} fueron similares para ambos métodos. Mediante un ajuste por regresión múltiple, se encontró que la temperatura ambiental máxima y la radiación son estimadores robustos de la evaporación, lo cual coincide con Ter Braak (1990); el modelo obtenido por el método de regresión múltiple se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$y = -254.8832 + 6.4635T_{max} + 0.5647 RSE_{max} ,$$

$$R^2 = 0.9794^{**} \quad [Ecuación 4]$$

Donde:

y es la evapotranspiración de referencia en $mm\ mes^{-1}$, T_{max} es la temperatura máxima y RSE_{max} es la radiación solar extraterrestre máxima, en $cal\ cm^{-2}\ día^{-1}$.

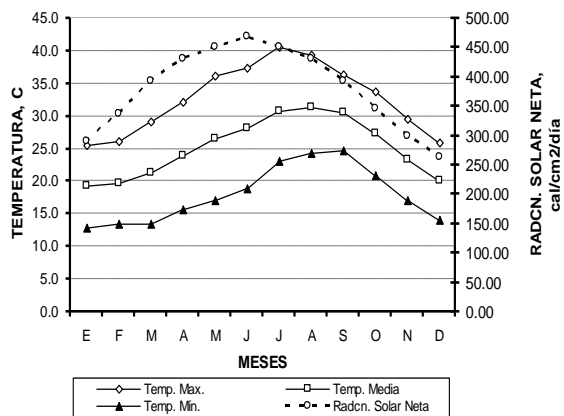


Figura 1. Tendencia de la temperatura y radiación solar neta en el Valle de La Paz, Baja California Sur.

Los valores estimados para ET por tres métodos para la zona productora cítrica de La Paz, B.C.S., se observan en la Figura 2, donde se detectan tendencias con una asociación numérica estrecha y en consecuencia con una elevada correlación. En la Figura 3 se observa la relación numérica que guarda el modelo de ET propuesto con el de la evaporación de tanque, en el Valle de La Paz, B.C.S. Los resultados obtenidos comprueban la aplicabilidad del modelo climático basado en la temperatura máxima y radiación solar extraterrestre, ensayado en el cultivo del naranjo; al evaluar el nivel de ajuste entre el modelo propuesto con el del tanque evaporímetro, se encontró una elevada correlación, con $R^2=0.9757$ y $r=0.9878$. La simplicidad del modelo desarrollado permite a investigadores y técnicos realizar un preciso pronóstico de la demanda de agua requerida, estimada mediante el cálculo de la evapotranspiración, requiriéndose de la disponibilidad de dos variables climáticas, generalmente disponibles en estaciones climatológicas, en cartas climáticas o en bases de datos de referencia.

Se encontró que el método de Blanney-Criddle subestima ligeramente el proceso de ET, principalmente en los meses en que se empieza a acentuar la sequía, de abril a julio, en las condiciones semiáridas secas de la cuenca de La Paz, Baja California Sur, en el noroeste de México, lo cual puede implicar un riesgo para la productividad del cultivo, dada la posibilidad de permitir la ocurrencia de estrés hídrico.

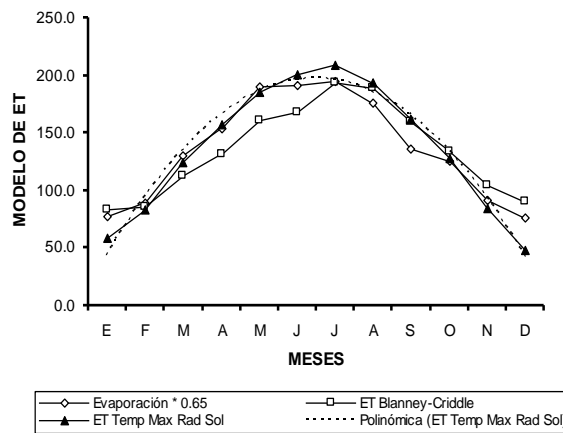


Figura 2. Determinaciones de la evapotranspiración de referencia, ET por tres métodos en La Paz, B.C.S.

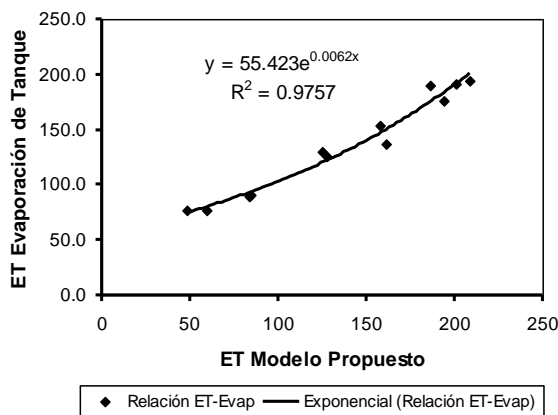


Figura 3. Relación numérica entre la ET propuesta y el modelo de la evaporación de tanque, en el Valle de La Paz, Baja California Sur, México.

La ET del naranjo se ha reportado para diferentes regiones entre 9000 y 12000 m³ ha⁻¹ anuales. Para solventar los riesgos de estrés hídrico, se sugiere aplicar riegos oportunos cuando la humedad retenida por el suelo se abata en 40 ó 50 % (González *et al.*, 1983; Shalhevet y Levy, 1990). En el cuadro 2 se observan la estimaciones de demanda de agua por el agroecosistema de naranjo; la demanda de agua promedio se determinó en 6.8 y 5.2 mm día⁻¹, mediante métodos indirectos y directos de estimación de la ET respectivamente, con una diferencia de 30.8% entre ellos. Las desviaciones estándar fueron 0.05 y 0.03 y los coeficientes de variación 7.35 y 5.77%, en el mismo orden. El requerimiento de agua neto demandado para mantener una hectárea del agroecosistema de naranjo por día fue de 25 y 19 m³, por semana de 175 y 134 m³ y por mes de 751 y 574 m³, mediante métodos indirectos y directos respectivamente.

Cuadro 2. Comparación de la evapotranspiración con métodos directos e indirectos en La Paz, B. C. S.

Parámetro	Métodos	
	Directo ETr	Indirectos ETo
Demanda diaria de agua, mm	6.8	5.2
Desviación estándar	0.05	0.03
Coefficiente de variación, %	7.35	5.77
Demanda diaria de agua, m ³ ha ⁻¹	25	19

Los métodos que consideran además de los parámetros climatológicos, las características de suelo y la respuesta de la planta son modelos integradores, toda vez que revisten una mayor representatividad del agroecosistema; en este sentido, el uso de agua fundamentado en la aplicación de métodos que sobreestiman la ET implica un deterioro gradual y eventual agotamiento del acuífero que sustenta la producción.

CONCLUSIONES

Los modelos hidro-climáticos para estimar la ET₀ son de alta utilidad para el diseño y propuesta de calendarios de riego; sin embargo, deben calibrarse con los correspondientes muestreos de la humedad del suelo, con lo que se podrá corroborar su confiabilidad. En este contexto, la comparación entre los métodos para el cálculo de ET₀, usando datos climáticos, mostró correlación significativa entre los diferentes valores correspondientes a los períodos de humedad diferencial en Baja California Sur, de febrero a julio (período seco o árido) y de agosto a enero (período semiseco o semiárido).

Para el caso de árboles adultos en la zona citrícola de Baja California Sur se observa una evidente subestimación de la ET₀ calculada por el método de Blanney-Criddle en el periodo seco del año, la cual estuvo relacionada con valores altos de los K_p tabulados, los cuales a su vez estuvieron asociados a valores relativamente bajos de la temperatura media. El modelo de ET basado en la temperatura máxima y radiación solar es una alternativa de planeación hidroagrícola confiable ante una eventualidad de la falta de estaciones climatológicas en operación o de la ausencia de series de datos confiables, lo cual limita el uso y aplicación de modelos multifactoriales más complejos. La aplicación de riegos oportunos en una condición específica de la relación suelo-planta-agua obedece a los requerimientos hídricos. Favorece la absorción adecuada de agua y nutrientes, lo cual crea un balance óptimo entre la disposición de riego-

fertilizante, con un mayor rendimiento de biomasa útil (frutos), mejorando asimismo la capacidad de respuesta del agroecosistema. A su vez, el manejo sostenible del agua a partir de estimaciones precisas de la evapotranspiración en el cultivo de naranjo, permite obtener mejores índices productivos y una mayor rentabilidad para el sector productor frutícola.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero y material de la Fundación Produce de B.C.S., fondo sectorial CONACyT-SEP (Proyecto 095 C, Adecuación metodológica para la determinación de la huella hídrica), CIBNOR, e INIFAP y al Dr. Sergio Zamora Salgado por su apoyo en revisión y análisis de la información climática dispuesta en los métodos considerados en la estimación de la evapotranspiración de esta zona árida del Noroeste de México.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., M. E. Jensen, J. L. Wright, y R. D. Burman. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*. 81:650-662.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1999. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, FAO, Rome.
- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R.L., Howell, T.A., Itenfisu, D., Jensen, M.E. and Snyder, R.L. 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. *Amer. Soc. of Civil Eng. Reston, Virginia, USA*. 192p.
- Alves, L., A. Perrier y L. Pereira. 1998. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: How good is the big leaf. *American Society of Agricultural Engineers*. 41:345-351.
- Beyazgul, M., Y. Kayam y F. Engelsman. 2000. Estimation methods for crop water requirements in the Gediz Basin of Western Turkey. *Journal of Hydrology*. 299:19-26.
- Casa, R., G. Russell y B. Locascio. 2000. Estimation of evapotranspiration from a field of linseed in central Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*. 104:289-301.
- Cohen, S., Ianetz, A., Stanhill, G. 2002. Evaporative climate at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. *Agricultural and Forest Meteorology*. 111:83-91.
- CONAGUA. 2006. Estadísticas del agua en México. SEMARNAT-CONAGUA. 4A Edición. México. 198 p.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage. Paper 24*. Roma. 194 p.
- FAO. 1981. Agroecological zones project. Vol. III. Methodology and results for Mexico, Central and South America. Rome, Italy.
- FAO. 1990. Report on the expert consultation of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. *Land & Water Development Division*. Roma. 37 p.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de Clasificación Climática de Köppen. 4ª. Ed. Offset Laros. México, D. F. 219 p.
- González-G., R., Padrón-Chávez, J.E., Ramírez-Díaz, J.M, Sánchez-S., J.A., Vázquez-P., L., Villareal-Elizondo, H. 1983. Guía para el cultivo de los cítricos en Nuevo León. Folleto técnico núm. 1. SARH. INIA. General Terán N. L. Mex. 86 p.
- González L., P. y González L., L. 2002. Diagnóstico para el desarrollo integral de la citricultura en el estado de Baja California Sur. *Integra S.A. Gobierno del Estado de B.C.S.* 59 p.
- Grageda G, J., Osorio A, G., Sabori P, R., y Ramírez A, J.L. 2002. Uso de estaciones meteorológicas automatizadas en la agricultura. Folleto Téc. Núm. 24. SAGARPA-INIFAP. Hermosillo, Son. Méx. 28 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1994. Síntesis geográfica del Estado de Baja California Sur. Carta estatal de suelos 1:1,000,000. La Paz, B.C.S., México.
- Lage, M., Bamouh, A, Karrou, M., El Mourid, M. 2003. Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and Pan evaporation methods under Moroccan conditions. *Agronomie*. 23:625-631.
- Malek, E. 1987. Comparison of alternative methods for estimating ETp and evaluation of advection in the Bajgab area of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*. 39:185-192.

- Medina G., G., Ruiz C., J. A. y Martínez P., R. A. 1998. Los climas de México: Una estratificación ambiental basada en el componente climático. Libro técnico No.1. SAGAR-INIFAP-CIRPAC. México. 104 p.
- Ortega-Farías, S., Cuenca, R.H. 1998. Estimation of Crop Evapotranspiration by Using the Penman-Monteith Method with a Variable Canopy Resistance. *Water Resources Engineering '98*, edited by Abt, S.R., Young-Pezeshk, J. and Watson, C.C. American Society of Civil Engineers. Vol. 2:1806-1811.
- Pereira, R., Villa-Nova, N., Soares, A., Barbieri, V. 1995. A model for the class A pan coefficient. *Agricultural and Forest Meteorology*. 76:75-82.
- Rana, G., Katerji, N. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review, *European Journal of Agronomy*. 13:125-153.
- Ruiz C., J. A., G. Diaz P., R. Meza S., V. Serrano A., y G. Medina G. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Baja California Sur (Período 1961-2003). Libro Técnico Núm. 2. INIFAP-CIRNO. Cd. Obregón, Sonora, México. 268 p.
- Ruiz, D., Martinez, V., Cerda, A. 1997. Citrus response to salinity growth and nutrient uptake. *Tree Physiology*, 17:141-150.
- Sánchez-Cohen, I. 2005. Fundamentos para el manejo integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos. CENID-RASPA. INIFAP. Gómez Palacio Dgo, Méx. 272 p.
- SAGAR. (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural). 1997. Anuario estadístico de la producción agrícola en México. México, D.F.
- Shalhevet J, Levy, Y. 1990. Citrus trees. Irrigation of agricultural crops. *Agronomy monograph*, No 30. 951- 987 pp.
- Sotelo-R., E.D., Ortiz-T., C., Rizo-A., M.I. 2000. Generación de un modelo matemático para calcular la evaporación en el Estado de México. *Agricultura Técnica en México*. 26(1):151-158.
- Ter Braak, C.J.F. 1990. Update Notes: CANOCO version 3.10. *Agricult. Mathematics Group*. Wageningen. 35 pp.
- Tucker D, P; Alva A, K; Jackson L, K; Weahton T, A. 1995. Nutrition of Florida citrus trees. University of Florida. USA. 61 p. UC-Davis. 2007. http://biomet.ucdavis.edu/irrigation_scheduling/bis/BIS.htm. Consultado el 14 de dic., 2007.
- Villalobos-R., S., Castellanos-R., J.Z., Tijerina-Chávez, L., Crespo-Pichardo, G. 2005. Coeficientes de desarrollo del cultivo de brócoli con riego por goteo. *Terra Latinoamericana*. 23:329-333.
- Villanueva-Díaz, J., Loredó-O, C., Hernández-R, A. 2001. Requerimientos Hídricos de Especies Anuales y Perennes en las Zonas Media y Altiplano de San Luis Potosí. Folleto Téc. Núm. 12. SAGARPA-INIFAP. San Luis Potosí, S.L.P. 24 pp.
- Yang, S., Aydin, M., Yano, T., Li, X. 2003. Evapotranspiration of orange trees in greenhouse lysimeters. *Irrigation Science*. 21(4):145-149.

Submitted May 20, 2010– Accepted July 01, 2010

Revised received July 21, 2010