

## BALANCE HÍDRICO Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL ESTADO DE TABASCO, MÉXICO

### Water balance and climatic classification of the state of Tabasco, Mexico

O Ruiz-Álvarez ✉, R Arteaga-Ramírez, MA Vázquez-Peña, RE Ontiveros Capurata, R López-López

(ORA) (REOC) Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) Universidad Autónoma Chapingo. (UACH).  
Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo 56230 estado de México, México. osias.ruizalvarez@gmail.com

(RAR)(MAVP) Departamento de Irrigación Universidad Autónoma Chapingo

(RLL) INIFAP. Km 1 carretera Huimanguillo-Cárdenas. 86400 Huimanguillo, Tabasco, México

**Artículo recibido:** 01 de diciembre de 2010, **aceptado:** 16 de abril de 2012

**RESUMEN.** El trabajo consiste en el balance hídrico y clasificación climática para el estado de Tabasco, con el objeto de definir épocas y regiones con déficit o exceso de humedad y clasificar el clima de este Estado con la metodología de Thornthwaite. Del total de estaciones climatológicas del Estado, se seleccionaron 40 con datos promedios mensuales de temperatura y precipitación, el resto no contó con ambas variables. 25 de las 40 estaciones además tenían datos de evaporación. En el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) se utilizaron dos métodos: Hargreaves y el Tanque Evaporímetro, el primero se utilizó en las 40 estaciones y el segundo en las 25 que tienen el dato de evaporación (para éstas la  $ET_0$  también se calculó con Hargreaves). Con 20 de las 25, se generó un modelo lineal, al comparar los datos de  $ET_{0Tanque}$  contra  $ET_{0Hargreaves}$ . Las cinco restantes se utilizaron para conocer la bondad del modelo. La  $ET_{0Hargreaves}$  calculada en las 15 estaciones que no tuvieron datos de evaporación se corrigió con el modelo. A partir de la evapotranspiración de referencia y precipitación se realizó el Balance Hídrico Climático tipo Thornthwaite-Mather; así se encontraron cuatro regiones donde la humedad se comporta de modo diferente, los mayores excesos son al sur del estado y se constató que la estación Poblado C32 presenta un mayor déficit anual. Asimismo se obtuvieron los índices de humedad con los que se encontró que el estado de Tabasco tiene cinco tipos de clima.

**Palabras clave:** Balance Hídrico Climático, clasificación climática para el estado de Tabasco, evapotranspiración de referencia, índice de humedad.

**ABSTRACT.** This study focused on the water balance and climatic classification of the state of Tabasco, in order to define seasons and regions with a deficit or a surplus of moisture and to classify the climate of the state following Thornthwaite's method. Of the weather stations in the state, 40 were selected that provided average monthly values of temperature and rainfall. The others did not record these two variables. Of the 40 stations, 25 also had evaporation data. Two methods were used to calculate the reference evapotranspiration ( $ET_0$ ): the Hargreaves and the Evaporation Pan. The first was used in the 40 stations and the second in the 25 stations that had evaporation data (the  $ET_0$  was also calculated with the Hargreaves method for these last). A linear model was generated with 20 of the 25 stations, comparing the  $ET_{0Hargreaves}$  data with the  $ET_{0Tanque}$  data. The remaining five stations were used to determine the accuracy of the model. The model corrected the  $ET_{0Hargreaves}$  calculated for the 15 stations with no evaporation data. The Thornthwaite-Mather type Climatic Water Balance was calculated from the reference evapotranspiration and the rainfall. Four regions with different moisture were identified. The greatest surplus was located in the south of the state, and the Poblado C32 station presented the greatest annual deficit. The moisture indices obtained identified five types of climate for the state of Tabasco.

**Key words:** Climatic Water Balance, climatic classification for the state of Tabasco, reference evapotranspiration, moisture index.

## INTRODUCCIÓN

Conocer el régimen hídrico de una región tiene valiosas aplicaciones en diversas áreas. En ciencias agronómicas, con el objeto de minimizar riesgos en los procesos de producción sirve de base para la zonificación de cultivos, caracterización de sequías, determinación de épocas de siembra, programación de riego e identificación de necesidades de drenaje (Ferguson 1996; Lozada & César 2003; McCabe & Markstrom 2007). Una de las mejores maneras de conocer dicho régimen es por medio de un Balance Hídrico Climático (BHC). Este concepto se introdujo para referirse a las entradas y salidas de agua por lluvia (PP) y evapotranspiración (ET) en un sistema, lo que implica conocer la humedad disponible en el suelo al aplicar el principio de conservación de la materia en la zona radical de los cultivos y así saber el exceso o déficit a lo largo de una temporada (Kerkides *et al.* 1996; Roberto 2005).

El método más utilizado para realizar un BHC es el establecido por Thornthwaite & Mather (1955) y aplicado por Ferguson (1996), Lozada & César (2003), McCabe & Markstrom (2007) y Sharma *et al.* (2010). Ellos utilizan la Capacidad de Almacenamiento de agua del suelo (CA), el promedio mensual de precipitación (PP) y temperatura (T), con esta última estiman la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) (Kerkides *et al.* 1996). Diversos autores están de acuerdo que el período de información climática debe ser de por lo menos 30 años como sugiere la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Lozada & César 2003; Kar & Verma 2005).

Por otra parte, al entender que el clima de una zona provee una idea de las características del ambiente, tipo de suelo, flora y fauna; así como de los factores meteorológicos que lo definen (Mather & Yoshioka 1967). Además que se utiliza en la elaboración de mapas de climas, zonificación agrícola, Sistemas de Información Geográfica (SIG), estudios de impacto ambiental, escenarios climáticos, así como en investigación aplicada (de Souza *et al.* 2007). Sin embargo, investigar el clima de un territorio no es un proceso simple, ya que precisa de información multidisciplinaria y personal capacitado. Oliver (2005) señala que existe gran diversidad de mé-

todos, entre ellos están los desarrollados por Köppen (1918), Holdridge (1947), Troll (1958) y Peguy (1961). Sin embargo, muchos científicos se basan en la conjetura de que la vegetación y las masas de aire que llegan a la región son la mejor expresión del clima. Para otros la base de la clasificación es la precipitación y la temperatura. Para Thornthwaite (1948), estas clasificaciones presentan limitaciones sobre todo cuando se requieren para aplicación agrícola, por el motivo de que no consideran variables de suelo y flujos del ciclo hidrológico representados principalmente por la evapotranspiración de los cultivos (de Souza *et al.* 2007). Thornthwaite (1948) propuso una metodología para que los climas se ordenen de acuerdo al grado de humedad, al tomar en cuenta las necesidades hídricas de los cultivos (evapotranspiración); y con los resultados del BHC: Excesos (EXC) y Déficits (DEF) se determina el índice de humedad ( $I_h$ ), mismo que permite agrupar el clima en una de las clasificaciones que él propone (Thornthwaite 1948; Thornthwaite & Mather 1955). El  $I_h$  está determinado por los elementos climáticos que influyen en las entradas (precipitación) y salidas de agua (evapotranspiración) del sistema y se utiliza para conocer la disponibilidad de humedad para la vegetación (McCabe & Wolock 1991); valores positivos del  $I_h$  indican clima húmedo con exceso hídrico, mientras que valores negativos indican clima árido con un déficit de humedad. Un valor de cero es prueba de que existe un equilibrio entre la precipitación anual y la demanda de humedad del ambiente (Thornthwaite 1948, McCabe & Wolock 1991).

Con base en los estudios de Köppen (1918) y García (1973), Velázquez (1994) comenta que debido a su ubicación en el trópico, la cercanía al Golfo de México y por tener un terreno plano el estado de Tabasco posee clima tipo A con subtipos Am, Af, Af(m), Am(w) y Aw. Pero esta clasificación no considera la relación suelo-planta-atmósfera (Brutsaert 1982), que es necesaria para el planteamiento y desarrollo de proyectos agrícolas; por lo cual se plantea el presente trabajo con el objetivo de definir regiones y épocas con excesos o déficits hídricos y clasificar el clima de Tabasco de acuerdo al método de Thornthwaite.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación y características del área de estudio

Tabasco se localiza entre los meridianos 90° 59' 08" y 94° 07' 00" al oeste del meridiano de Greenwich y los paralelos 17° 15' 00" y 18° 38' 45" de latitud norte. Cuenta con una extensión territorial de 24 738 km<sup>2</sup> y clima dominante de tipo cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Velázquez 1994). En este Estado la precipitación promedio es del orden de los 2 500 mm anuales (Velázquez 1994). Los suelos predominantes son Vertisol éutrico (433 000 ha), Histosol fábriico y asociación de Gleysols (341 078 ha) y Fluvisol éutrico (245 828 ha) (López *et al.* 2007; Palma *et al.* 2007).

### Información climatológica

Del total de las estaciones climatológicas del estado de Tabasco reportadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se utilizaron 40 estaciones que contaron con datos normales de precipitación, temperaturas máximas y mínimas medias mensuales, además 25 de éstas tuvieron datos normales de evaporación media mensual del tanque tipo "A". La distribución espacial, así como su clave y nombre se presenta en la Figura 1.

### Determinación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>)

Se utilizaron dos métodos propuestos por Allen *et al.* (2006), que son: el de Hargreaves (ET<sub>0Hargreaves</sub>) y el tanque de evaporación tipo "A" (ET<sub>0Tanque</sub>).

Con el primero se calculó la ET<sub>0Hargreaves</sub> en las 40 estaciones y se utilizó la siguiente expresión:

$$ET_0 = ET_0.0023 (T_{media} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (1)$$

Donde: ET<sub>0</sub> = evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>); T<sub>media</sub> = temperatura media mensual (°C); T<sub>max</sub> = temperatura máxima mensual (°C); T<sub>min</sub> = temperatura mínima mensual (°C); R<sub>a</sub> = radiación extraterrestre en milímetros de evaporación (mm día<sup>-1</sup>).

Los valores de R<sub>a</sub> en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> (Mega-

joule metro cuadrado por día) para la latitud del estado de Tabasco y el método de conversión a milímetros de evaporación se retomaron de Allen *et al.* (2006).

El segundo se utilizó para calcular la ET<sub>0Tanque</sub> en las 25 estaciones (note que también en estas se calculó la ET<sub>0Hargreaves</sub>) que tienen el dato de evaporación y se realizó con la expresión:

$$ET_0 = E_{pan} * K_p \quad (2)$$

Donde: ET<sub>0</sub> = evapotranspiración de referencia (mm mes<sup>-1</sup>); K<sub>p</sub> = coeficiente de tanque (adim); E<sub>pan</sub> = evaporación del tanque (mm mes<sup>-1</sup>). El coeficiente de tanque (K<sub>p</sub>) fue de 0.80, que se recomienda para regiones tropicales donde prevalece alta humedad relativa y baja velocidad del viento (Doorenbos & Pruitt 1977; Palacios 2002).

Allen *et al.* (2006) aclaran que debido a que el método de Hargreaves fue establecido para climas áridos, al utilizarlo en condiciones de trópico húmedo se presenta una sobreestimación de ET<sub>0</sub> debido a la alta humedad relativa y baja velocidad del viento.

### Modelo de regresión lineal

De las 25 estaciones donde se calculó la ET<sub>0</sub> con los dos métodos propuestos se utilizaron los datos de 20 y se realizó un diagrama de dispersión para definir la relación que existe entre los datos calculados con el método del tanque Tipo "A" y el de Hargreaves, se propone el siguiente modelo lineal:

$$ET_0 = a + b ET_{0Hargreaves} \quad (3)$$

Donde: ET<sub>0</sub> = evapotranspiración de referencia obtenida con datos del tanque tipo "A" (mm mes<sup>-1</sup>); ET<sub>0Hargreaves</sub> = evapotranspiración de referencia obtenida por el método de Hargreaves (mm mes<sup>-1</sup>); a y b son parámetros de regresión. Si en este modelo se sustituyen los datos de la ET<sub>0Hargreaves</sub>, se transforman a ET<sub>0TanqueModelo</sub>.

Las cinco estaciones restantes (de las 25) que tienen datos de ET<sub>0</sub> con ambos métodos, se utilizaron para validar la ecuación 3 para lo cual se procedió de la siguiente manera:

Con el modelo lineal se calculó la ET<sub>0Tanquemodelo</sub>

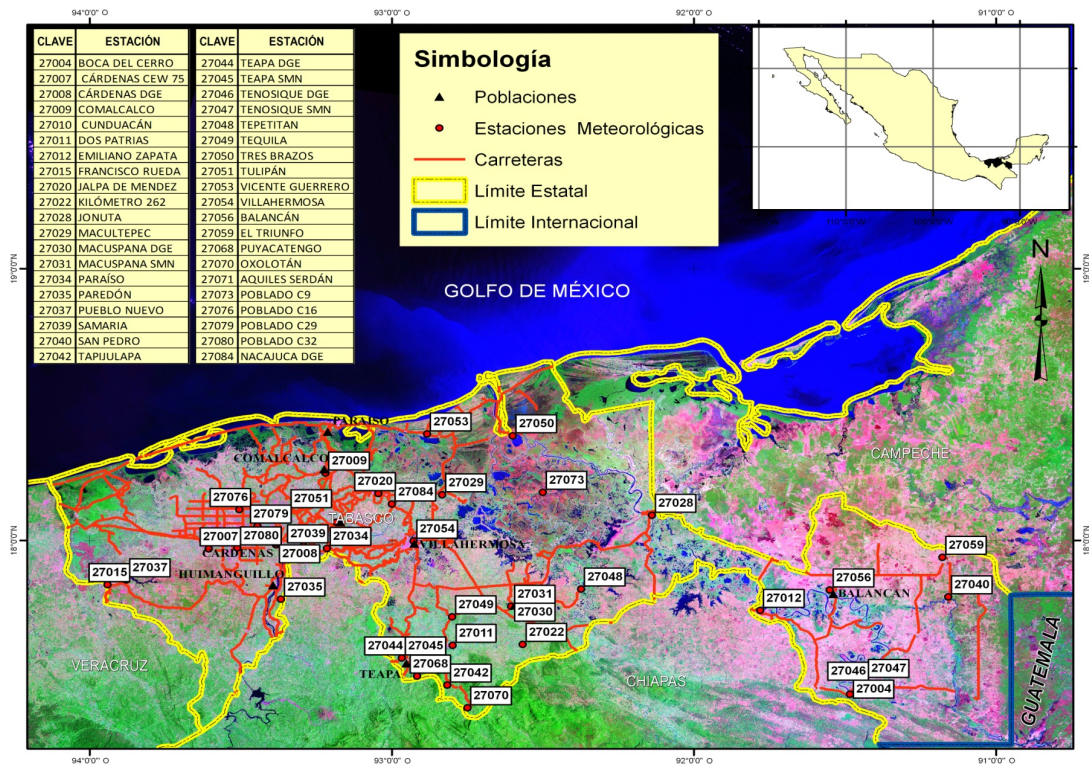


Figura 1. Distribución espacial de 40 estaciones climatológicas en el estado de Tabasco. Figure 1. Spatial distribution of 40 weather stations in the state of Tabasco.

en función de la  $ET_{0Hargreaves}$ , al considerar los datos de las cinco estaciones. Los valores de  $ET_{0Tanquemodelo}$  se compararon con los valores de  $ET_{0Tanque}$ , para definir qué tan semejantes son, se utilizaron los siguientes índices estadísticos.

### Índices estadísticos para evaluar el ajuste del modelo

Estudios realizados por George et al. (2000), Caí et al. (2007), Tojo et al. (2007) y Kang et al. (2009) indican que los índices utilizados para evaluar la bondad de ajuste de un modelo son:

a) Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RCCME):

$$RCCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{(n - 1)}}$$

donde: n = número de observaciones;  $Y_i = ET_{0Tanque}$  (evapotranspiración de referencia estimada

con el tanque evaporímetro);  $X_i = ET_{0Tanquemodelo}$  (evapotranspiración de referencia estimada con el modelo 3).

b) Error relativo (ER):

$$ER = \frac{RCCME}{\bar{X}}$$

donde:  $\bar{X}$  = promedio de los valores para  $X_i$  con  $i = 1, 2, \dots, n$ .

c) Coeficiente de determinación ( $R^2$ ):

$$R^2 = \frac{[\sum (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})]^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2 \sum (X_i - \bar{X})^2}$$

donde:  $\bar{Y}$  = promedio de los valores para  $Y_i$ ;

d) Índice de Willmott (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y'_i| - |X'_i|)^2}$$



donde:  $Y'_i = Y_i - \bar{X}$ ;  $X'_i = X_i - \bar{X}$

e) El coeficiente de regresión  $b$ , para la regresión a través del origen relaciona los conjuntos de datos  $Y_i$  y  $X_i$ .

f) El modelo tiene buen comportamiento cuando  $d \geq 0.95$  y  $ER \leq 0.20$  (George *et al.* 2000; Tojo *et al.* 2007; Kang *et al.* 2009), también cuando  $b$  es cercano a 1.0 ( $1.0 \pm 0.10$ ) y  $R^2 > 0.80$  (Caí *et al.* 2007).

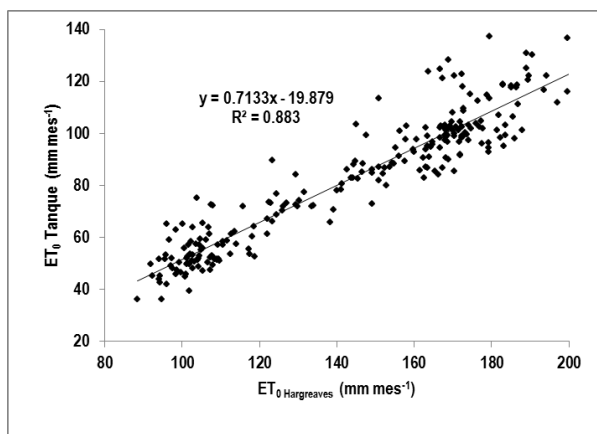


Figura 2. Relación entre la  $ET_0$  obtenida con el método de Hargreaves y Tanque de evaporación.

Figure 2. Relationship between  $ET_0$  obtained with the Hargreaves and the Epan methods.

### Datos de suelo

La textura del suelo representativa para el estado de Tabasco es arcilla (López *et al.* 2007; Palma *et al.* 2007).

La capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CA) se determinó con la textura representativa (arcilla) y la profundidad promedio (70 cm) del suelo del estado de Tabasco, al aplicar el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Este método se basa en el uso de tablas, donde se establece que a un suelo de textura y profundidad conocidas corresponde una lámina de agua (cm de agua por cada 10 cm de suelo) específica. (Palacios 2002).

### Balance hídrico climático (BHC)

El balance hídrico climático se realizó con el método descrito por Thornthwaite & Mather (1955); el cual se aplica en diversos estudios (Ferguson 1996; Kerkides *et al.* 1996; Lozada & César 2003; Kar & Verma 2005; Roberto 2005; de Souza *et al.* 2007; McCabe & Markstrom 2007; Sharma *et al.* 2010) donde se afirma que este proceso se representa por la ecuación:

$$HA_i = HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} \quad (4)$$

donde:  $HA_i$  = humedad almacenada del mes actual (mm);  $HA_{i-1}$  = humedad almacenada del mes anterior (mm);  $P_i$  = precipitación del mes actual (mm);  $ET_{0i}$  = evapotranspiración de referencia del mes actual (mm).

Existe déficit de humedad si  $HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} < 0$ ; por otro lado, hay exceso hídrico si  $HA_{i-1} + P_i - ET_{0i} > CA$ . Si el valor numérico obtenido del cálculo se encuentra entre cero y CA, ese valor corresponde a la humedad almacenada (HA) del período y es el que se considera para el cálculo en el período subsecuente.

### Índice de humedad ( $I_h$ )

El índice de humedad relaciona los excesos y déficits con la demanda evapotranspirativa del medio, lo que proporciona una clara descripción del clima (Thornthwaite 1948; McCabe & Wolock 1991). La ecuación que describe esta relación es:

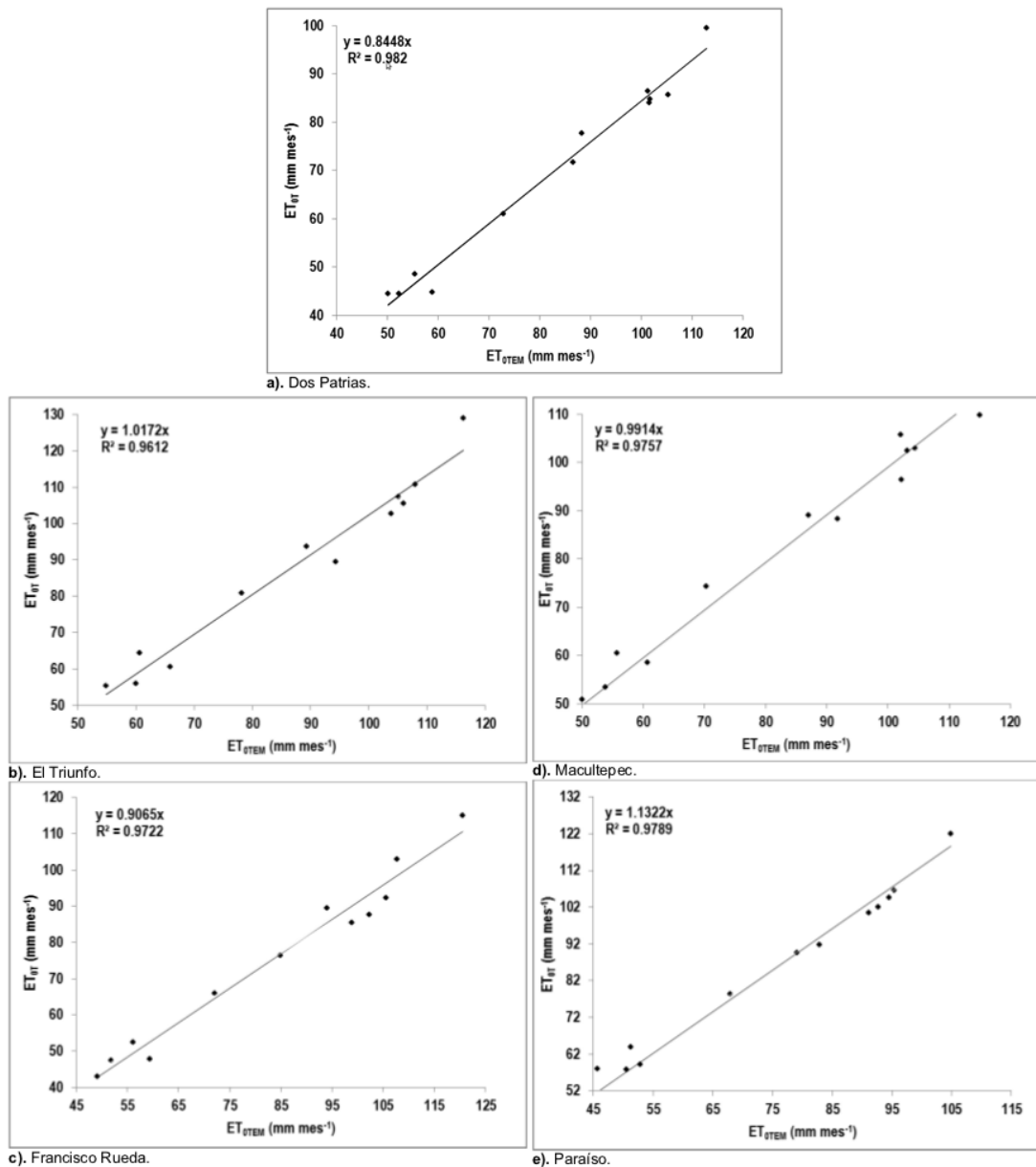
$$I_h = \frac{100(EXC - DEF)}{ET_0} \quad (5)$$

Donde:  $I_h$  = índice de humedad (%); EXC = exceso hídrico ( $mm \text{ año}^{-1}$ ); DEF = déficit hídrico ( $mm \text{ año}^{-1}$ );  $ET_0$  = evapotranspiración de referencia ( $mm \text{ año}^{-1}$ ).

A partir de este índice se realiza la clasificación de climas propuestos por Thornthwaite, que se tienen en la Tabla 1.

### RESULTADOS

El análisis de regresión al que se sometieron los datos de las 20 estaciones donde se re-



**Figura 3.**  $ET_{0Tanque}$  en oposición a  $ET_{0TEM}$  para las cinco estaciones: (a) Dos Patrias (b) El Triunfo (c) Francisco Rueda (d) Macultepec (e) Paraíso.

**Figure 3.**  $ET_{0Epan}$  versus  $ET_{0TEM}$  for the five meteorological stations: (a) Dos Patrias (b) El Triunfo (c) Francisco Rueda (d) Macultepec (e) Paraíso.

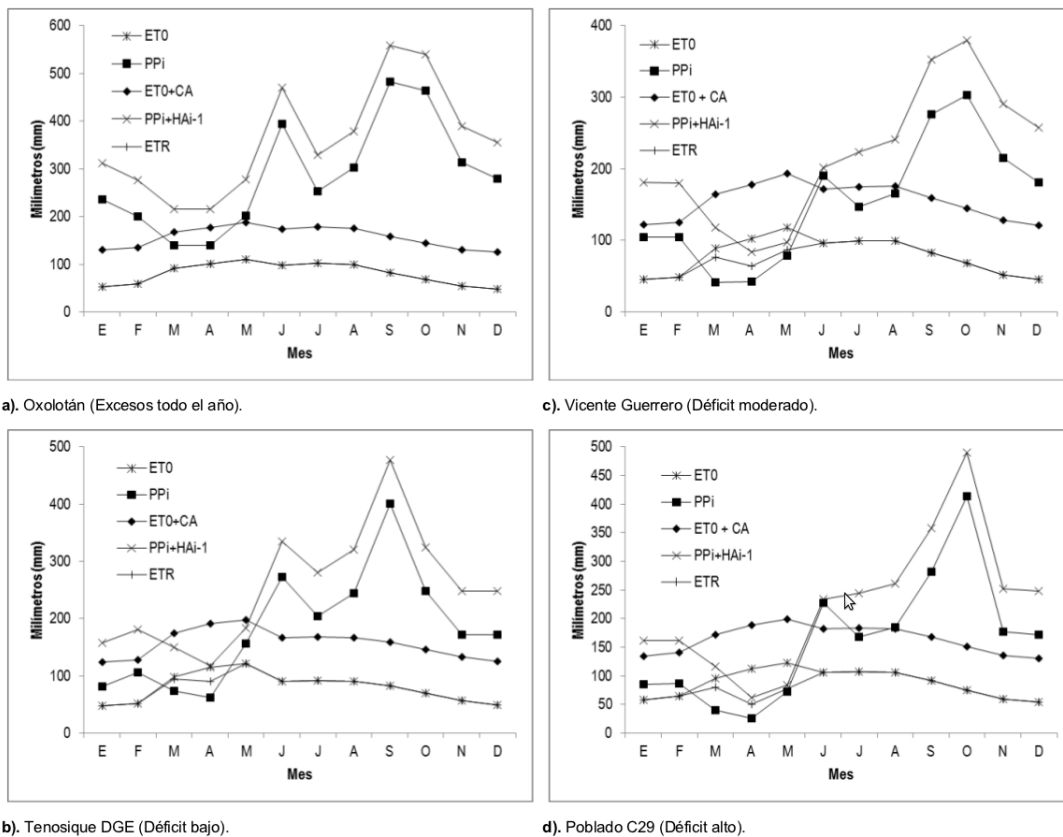
lacionó la  $ET_0$  obtenida con el método de Hargreaves ( $ET_{0Hargreaves}$ ) y Tanque evaporímetro ( $ET_{0Tanque}$ ) se presenta en la Figura 2. En ella se aprecia la estrecha relación y el alto grado de ajuste que existe entre los valores estimados por ambos métodos, así como el alto valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

### Comparación de $ET_0$ estimada con el tanque de evaporación ( $ET_{0Tanque}$ ) y la calculada con el modelo lineal ( $ET_{0TanqueModelo}$ )

En la Tabla 2 se muestran los índices estadísticos obtenidos al comparar los valores de  $ET_0$  calculados con el Tanque evaporímetro para las cinco estaciones, con los calculados con la ecuación

**Tabla 1.** Clasificación climática (% porcentaje).  
**Table 1.** Climatic classification (% percentage).

Tipo de clima	Índice de humedad (%)
A Perhúmedo	> 100
B4 Húmedo	80 a 100
B3 Húmedo	60 a 80
B2 Húmedo	40 a 60
B1 Húmedo	20 a 40
C2 Húmedo subhúmedo	0 a 20
C1 Seco subhúmedo	-20 a 0
D Semiárido	-40 a -20
E Árido	-60 a -40



**Figura 4.** Balance hídrico para cada estación representativa ( $ET_0$ : evapotranspiración de referencia,  $PP_i$ : precipitación del mes actual,  $ET_0+CA$ : evapotranspiración de referencia más capacidad de almacenamiento de agua del suelo,  $PP_i+HA_{i-1}$ : precipitación del mes actual más la humedad almacenada del mes anterior, ETR: evapotranspiración real): (a) Oxolotán (Excesos todo el año) (b) Tenosique SMN (Déficit bajo) (c) Vicente Guerrero (Déficit moderado) (d) Poblado C29 (Déficit alto).

**Figure 4.** Water balance for each representative station ( $ET_0$ : reference evapotranspiration,  $PP_i$ : current month rainfall,  $ET_0+CA$ : reference evapotranspiration plus soil water storage capacity,  $PP_i+HA_{i-1}$ : current month rainfall plus the stored moisture from the previous month, ETR: actual evapotranspiration): (a) Oxolotán (Surplus all year) (b) Tenosique SMN (Low deficit) (c) Vicente Guerrero (Moderate deficit) (d) Poblado C29 (High deficit).

del modelo ( $ET_{0TanqueModelo}$ ):  $y = 0.7133x - 19.879$ . Puede apreciarse que para el caso de d, todas las estaciones presentan valores que van de 0.90 a 0.99

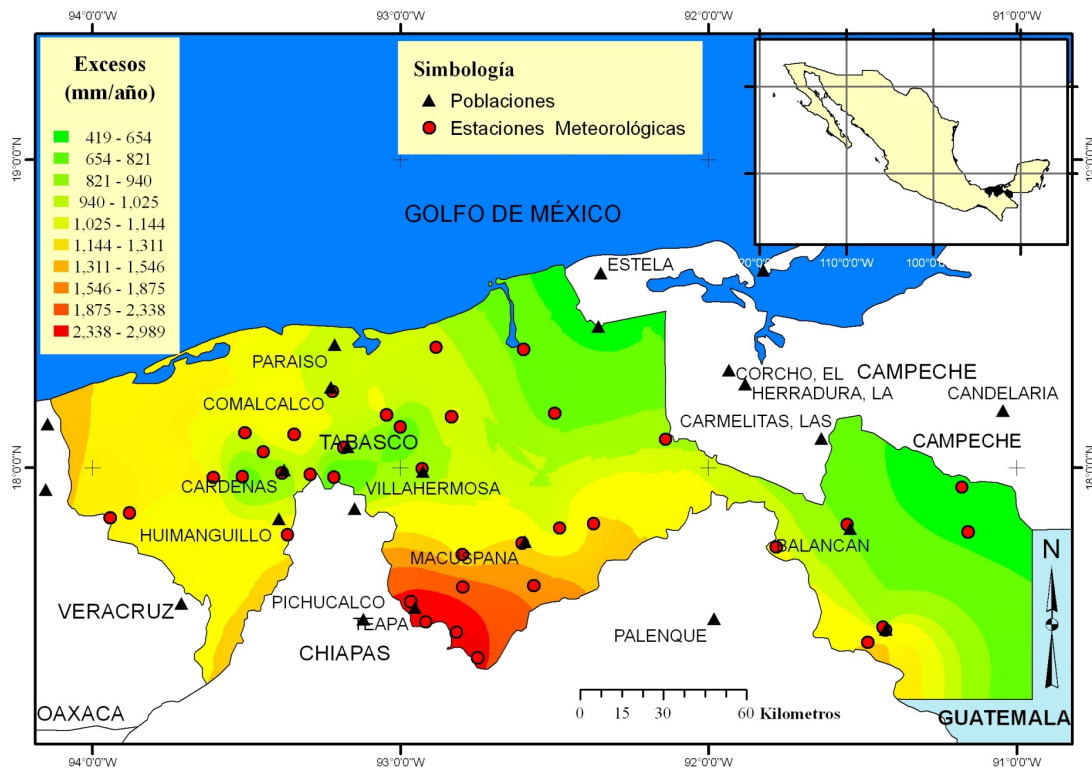
por lo que se consideran aceptables. Respecto a  $R^2$  y  $R_0^2$  corresponden respectivamente a valores mínimos de 0.85 y 0.84; no presentándose diferencia signifi-

**Tabla 2.** Índices estadísticos para la comparación de  $ET_0$  obtenida con el tanque evaporímetro y con la ecuación del modelo.

**Table 2.** Statistical indices for the comparison of the  $ET_0$  obtained with the Evaporation Pan and that obtained with the equation of the model.

Estación	RCCME	ER	$R^2$	$R_0^2$	d	b
Global	9.173	0.111	0.85	0.849	0.96	0.974
Dos Patrias	14.058	0.171	0.982	0.982	0.904	0.845
El Triunfo	5.079	0.058	0.966	0.961	0.988	1.017
Francisco Rueda	9.375	0.112	0.974	0.972	0.964	0.907
Macultepec	3.525	0.042	0.98	0.976	0.994	0.991
Paraíso	11.293	0.149	0.986	0.979	0.936	1.132

RCCME: raíz cuadrada del cuadrado medio del error, ER: error relativo,  $R^2$ : coeficiente de determinación completo,  $R_0^2$ : coeficiente de determinación al origen, d: índice de Willmott, b: coeficiente de regresión y Global: se considera la información de las cinco estaciones.



**Figura 5.** Distribución espacial de los excesos en Tabasco.  
**Figure 5.** Spatial distribution of surplus in Tabasco.

cativa entre ambos índices para cada estación. En cuanto a RCCME y ER, los mejores resultados (menor índice) corresponden a Macultepec y El Triunfo, mientras que los desfavorables (mayor índice) son para Dos Patrias y Paraíso. El coeficiente b, se encuentra en el rango de 0.84 a 1.13, donde los mejores resultados son para las estaciones de: El Triunfo,

Francisco Rueda, Macultepec y para Global, que son los datos de  $ET_0$  de las cinco estaciones.

En la Figura 3, se muestra el ajuste de los valores entre  $ET_{0Tanque}$  (Y) y  $ET_{0TanqueModelo}$  (X) para las cinco estaciones. Se observa que  $ET_{0TanqueModelo}$  es muy próxima a  $ET_{0Tanque}$  en El Triunfo, Francisco Rueda y Macultepec. Este re-



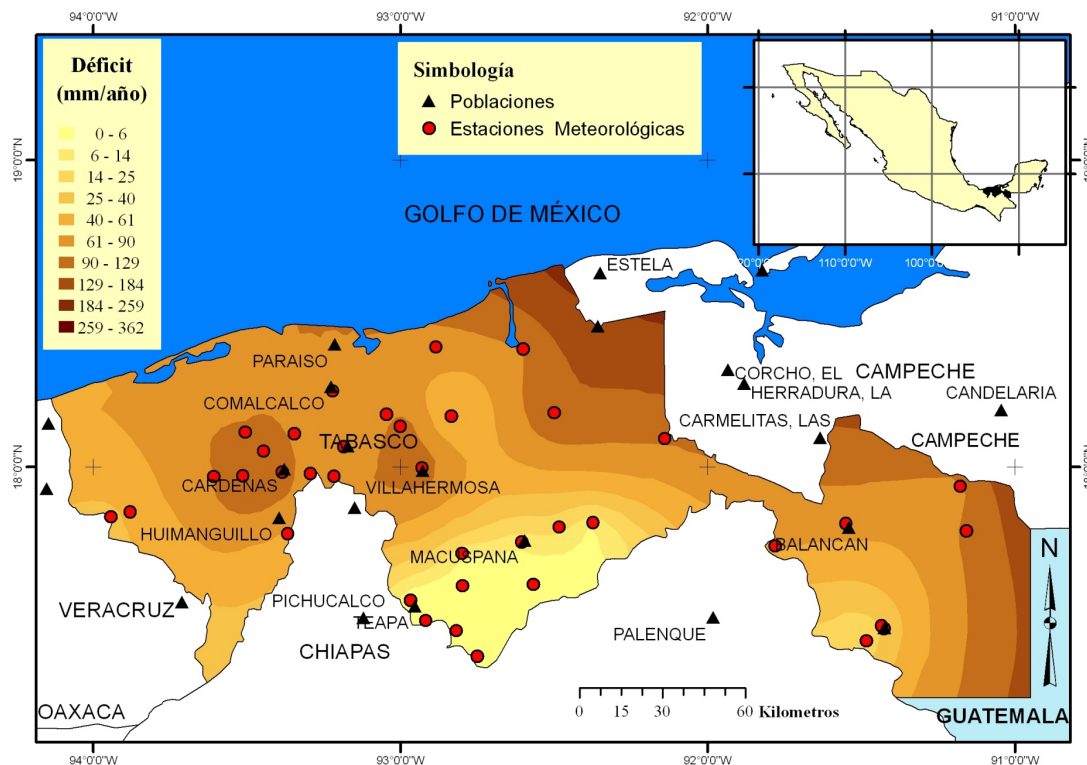


Figura 6. Distribución espacial de los déficits en Tabasco.  
Figure 6. Spatial distribution of deficits in Tabasco.

sultado se confirma por los valores de  $b$  cercanos a 1.

### Capacidad de almacenamiento de agua del suelo

La capacidad de almacenamiento de agua del suelo estimada con el método del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos para el estado de Tabasco fue de 76.3 mm.

### Balance Hídrico Climático

Los resultados del balance hídrico climático indican que el estado de Tabasco tiene regiones con: excesos todo el año, déficit bajo, déficit moderado y déficit alto. En la Figura 4, se presentan gráficas de BHC de las estaciones Oxolotán; Tenosique DGE; Vicente Guerrero y Poblado C29, las cuales son representativas de las regiones previamente mencionadas. En las gráficas se observa que para el caso de la región representada por la estación Oxolotán, todo el año presenta excesos, ya que  $PP_i + HA_{i-1}$

es mayor que  $ET_0 + CA$  en todos los meses. Para las otras regiones se identificaron un período seco y otro húmedo; cuyas duraciones difieren para cada región.

Con los resultados obtenidos del balance hídrico, se generaron mapas estatales de distribución de las principales variables climáticas. En la Figura 5 puede apreciarse que los mayores excesos se registran al sur del Estado, principalmente hacia las montañas del norte de Chiapas donde se ubican Dos Patrias, Puyacatengo, Kilómetro 262, Oxolotán, Tapijulapa y Teapa. En relación con los déficits, los valores más altos se presentan al centro, norte y noreste del Estado (Figura 6). Con el valor anual de los excesos, déficits y evapotranspiración de referencia se obtuvieron los índices de humedad, cuyos valores más altos se distribuyen en lugares con mayor precipitación, los más bajos en áreas con menor cantidad de lluvia anual y elevada evapotranspiración. Con dichos índices se realizó la clasificación climática con el método de Thornthwaite (Thornthwaite

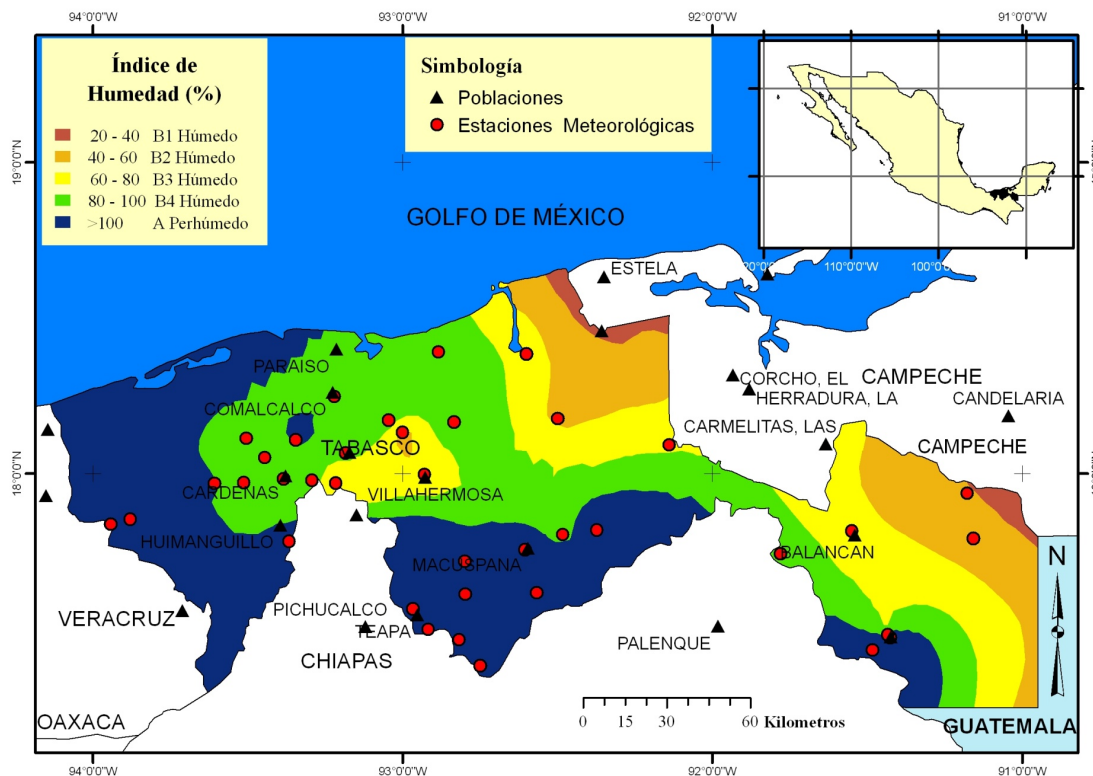


Figura 7. Distribución espacial de los climas de Tabasco.  
Figure 7. Spatial distribution of climates Tabasco.

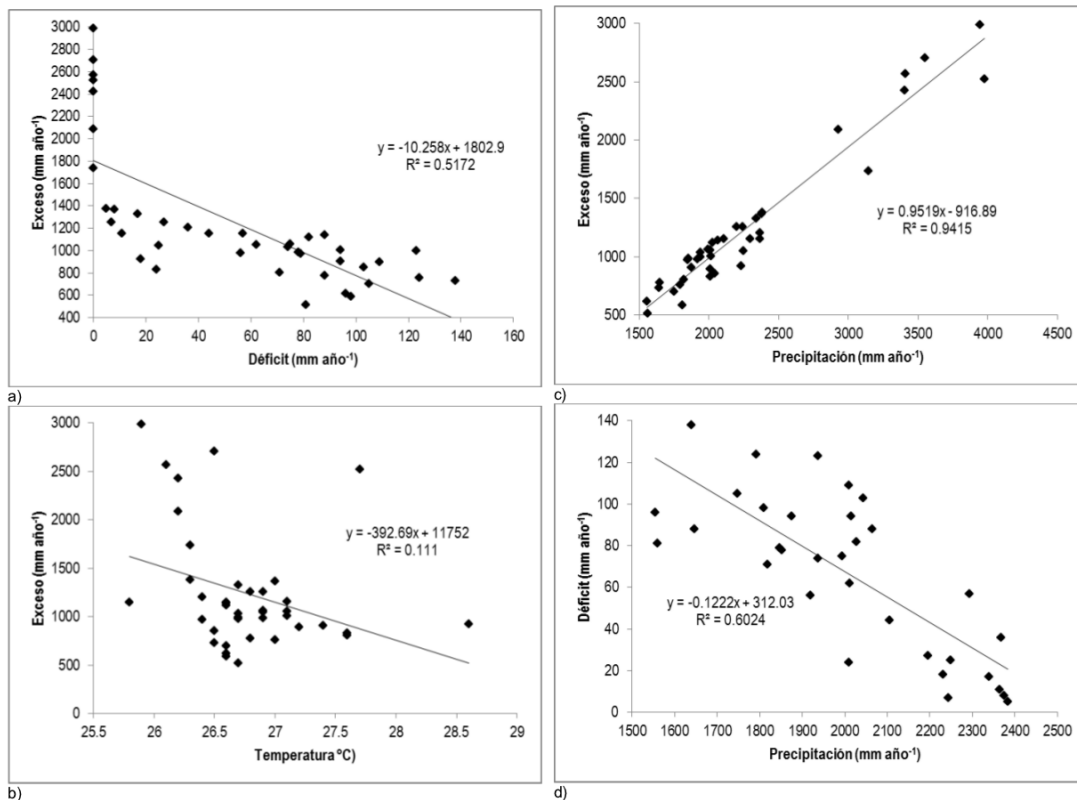
1948); encontrándose que en Tabasco existen cinco diferentes tipos de clima, cuatro con la categoría de húmedo, que se diferencian por el valor del índice y un perhúmedo. (Figura 7).

## DISCUSIÓN

A pesar de que el resultado obtenido para el índice b (Tabla 2), es un poco bajo (0.845) para la estación Dos Patrias y un poco alto para la estación Paraiso % (1.132), en función del rango donde se consideran aceptables ( $1.0 \pm 0.10$ ) (Caí et al. 2007; Kang et al. 2009), se concluye que las correcciones realizadas a  $ET_{0Hargreaves}$  con la ecuación obtenida del modelo lineal, presenta resultados aceptables, por tanto, se sugiere su uso para ajustar los valores de  $ET_{0Hargreaves}$  de la región.

La humedad que se distribuye en el Estado, se observa que varía en función del área geográfica y variables climatológicas (PP y  $ET_0$ ) (Kerkides et

al. 1996), sin embargo, se encontró que la variación de la humedad también ocurre a nivel regional, tal es el caso del municipio de Macuspana; ya que la estación kilómetro 262 presenta excesos casi todo el año, mientras que en Aquiles Serdán, Macuspana SMN, Macuspana DGE y Tepetitán se registran déficits bajos (Figura 6). Para el municipio de Centro; Macultepec y Pueblo Nuevo presentan déficit bajo y al mismo tiempo Villahermosa presenta déficit alto. En el municipio de Huimanguillo; Francisco Rueda presenta déficit bajo, mientras que Paredón déficit moderado y el Poblado C32 déficit alto, esta comunidad expresa el déficit más alto de la entidad tabasqueña. Por su parte Cárdenas, en la estación Cárdenas CEW75 y Poblado C16 tienen déficit moderado, en tanto que Cárdenas DGE, Poblado C9 y Poblado C29 déficit alto. Estas diferencias de humedad (excesos y déficits) a nivel regional, son provocadas por la variación espacial de la evapotranspiración de referencia y la precipitación así como por las carac-



**Figura 8.** Correlación entre variables climáticas y variables obtenidas del balance hídrico.  
**Figure 8.** Correlation between climatic variables and those obtained from the water balance.

terísticas fisiográficas y de vegetación intrínsecas de cada localidad (Mintz & Serafini 1992).

La humedad también presenta variación respecto a la época del año (Kerkides *et al.* 1996; Sreedevi 2002). Las estaciones Campo Experimental Puyacatengo, Dos Patrias, Oxolotán, Tapijulapa, Teapa DGE y Teapa SMN tienen un período húmedo y con excesos a lo largo de todo el año, esto se debe a que presentan valores anuales bajos de evapotranspiración de referencia (Ruíz *et al.* 2011) y valores altos de precipitación. Las estaciones restantes presentan un período húmedo y otro seco, el primero es de junio a febrero a excepción de: El Triunfo y San Pedro que es de junio a enero, Tepetitán y Kilómetro 262 lo tienen de junio a marzo; mientras que Nacajuca DGE y Paraíso DGE es de agosto a febrero y Poblado C32 de julio a febrero. Para todas las estaciones que presentan período seco, es de marzo a mayo, debido a los valores más altos de evapotranspiración de referencia (Ruíz *et al.* 2011)

y los más bajos de precipitación (Mintz & Serafini 1992); a excepción de las estaciones Aquiles Serdán, Boca del Cerro, Macuspana DGE, Tenosique DGE y Tenosique SMN que lo presentan de marzo a abril; para Macuspana SMN y Tequila es de abril a mayo; y Tepetitán en abril. La diferencia en duración de los períodos con déficit o exceso hídrico entre una estación y otra, se debe a la configuración local de los factores climáticos y fisiográficos que hacen variar la evapotranspiración y la precipitación (Doria & Madramootoo 2009; Zhiqiang *et al.* 2009; Ruíz *et al.* 2011) En la Figura 4 se observa la variación de humedad a lo largo del año. Nuestros resultados son similares a lo mencionado por Velázquez (1994), Salaya *et al.* (2002), Meléndez *et al.* (2006), Estrada *et al.* (2007) y Ruiz *et al.* (2012).

En la Figura 8 se presentan diagramas de dispersión entre déficit y exceso (a), exceso y temperatura (b), precipitación y exceso (c); y precipitación y déficit (d). Para (a) (b) y (c) se utilizan datos de

las 40 estaciones empleadas en el estudio, en (d) sólo las estaciones que presentan un tipo de déficit. Para el primer caso (a), nótese que las estaciones que presentan exceso superior a 1500 mm no tienen déficit y en las estaciones con ambas situaciones la mayoría de excesos se encuentran en el rango de 600 a 1200 mm. En (b) se observa que la mayor parte de excesos están entre 600 y 1500 mm y en el rango de temperatura de 26 a 27.5 °C. Una relación estrecha se aprecia en (c) y como era de esperarse,

se ve que la magnitud de los excesos aumenta conforme aumenta la precipitación, además la mayoría de los excesos ocurren en el rango de 1500 a 2500 mm de precipitación, en esta situación se encuentra el 82.5 % del total de estaciones consideradas en el estudio. En (d), se verifica que las variables presentan buena correlación, el orden descendente de la distribución muestra que cuando la precipitación aumenta el déficit disminuye y viceversa.

## LITERATURA CITADA

- Allen GR, Pereira LS, Raes D, Smith M (2006) Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Roma. 298 pp.
- Brutsaert WF (1982) Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland. 299 pp.
- Caí J, Liu Y, Lei T, Santos PL (2007) Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology* 145: 22-35.
- de Souza RG, Paes dCMB, Grosseli LD, Leite dMJF (2007) Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia: revista de ciencias agronômicas* 66(4): 711-720.
- Doorenbos J, Pruitt W (1977) Las necesidades de agua de los cultivos. FAO. Roma. 194 pp.
- Doria RO, Madramootoo CA (2009) Estimation of irrigation requirements for some crops in southern Quebec using CROPWAT. *Irrigation and Drainage*. Published online in Wiley InterScience: <http://www.interscience.wiley.com>; DOI:10.1002/ird.497.
- Estrada BMA, Nikolskii GI, Mendoza PJD, Cristóbal AD, de la Cruz LE, Brito MNP, Gómez VA, Bakhlaeva EO (2007) Lixiviación de nitrógeno en suelos agrícolas bajo diferentes tipos de drenaje en el trópico húmedo. *Universidad y ciencia* 23(1): 1-14.
- Ferguson B (1996) Estimation of Direct Runoff in the Thornthwaite Water Balance. *Professional Geographers* 48(3): 263-271.
- García E (1973) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F. 246 pp.
- George B, Shende S, Raghuwanshi N (2000) Development and testing of an irrigation scheduling model. *Agricultural Water Management* 46: 121-136.
- Holdridge LR (1947) Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105: 367-368.
- Kang S, Evett SR, Robinson CA, Payne WA (2009) Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity. *Agricultural Water Management* 96: 167-178.
- Kar G, Verma H (2005) Climatic water balance, probable rainfall, rice crop water requirements and cold periods in AER 12.0 in India. *Agricultural Water Management* 72: 15-32.

- Kerkides P, Michalopoulou H, Papaioannou G, Pollatou R (1996) Water balance estimates over Greece. *Agricultural Water Management* 32: 85-104.
- Köppen W (1918) Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Petermanns Mitteilungen* 64: 193-203.
- López GADR, Palma GB, Hernández RMA, Ojeda MME, Ángeles PA, Ruiz NJA, García MMJ (2007) Caracterización fisicoquímica de los suelos predominantes en el estado de Tabasco. *Conciencia Tecnológica* 7(34): 45-46.
- Lozada GBI, César SP (2003) Diferencias entre las deficiencias y excedentes hídricos estimados a partir del balance hídrico climático normal y secuencial de las localidades de Bramon, Venezuela, y Piracicaba, Brazil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 11(1): 195-198.
- Mather J, Yoshioka G (1967) The role of climate in the distribution of vegetation. *Association of American Geographers* 3: 29-41.
- McCabe G, Markstrom S (2007) A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. Reston, Virginia 6 pp.
- McCabe GJ, Wolock DM (1991) Detectability of the effects of a hypothetical temperature increase on the Thornthwaite moisture index. *Journal of Hydrology* 125: 25-35.
- Meléndez NF, González MJA, Pérez PJ (2006) Manejo tecnológico del pasto estrella africana en el trópico. ISPROTAB. Segunda edición. Villahermosa, Tabasco; México. 79 pp.
- Mintz Y, Serafini YV (1992) A global monthly climatology of soil moisture and water balance. *Climate Dynamics* 8: 13-27.
- Oliver J (2005) *Encyclopedia of world climatology*. Springer. New York. 854 pp.
- Palacios VE (2002) ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar? Para lograr mejores cosechas. Trillas. México. 214 pp.
- Palma LDJ, Cisneros DJ, Moreno CE, Rincón RJA (2007) Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 195 pp.
- Peguy ChP (1961) *Précis de Climatologie*. Paris: Masson et Cie. 347 pp.
- Roberto PA (2005) Simplificado o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia: revista de ciencias agronómicas* 64(2): 311-313.
- Ruíz AO, Arteaga RR, Vázquez PMA, López LR, Ontiveros CRE (2011) Requerimiento de riego y predicción del rendimiento en gramíneas forrajeras mediante un modelo de simulación en Tabasco, México. *Agrociencia* 45: 745-760.
- Ruíz AO, Arteaga RR, Vázquez PMA, Ontiveros CRE, López LR (2012) Inicio de la estación de crecimiento y períodos secos en Tabasco, México. *Tecnología y ciencias del agua* 3 (2): 85-102.
- Salaya DJM, Carrillo AE, Palacios VOL, Aceves NLA, Juárez LJF (2002) Respuesta del cultivo de sandía (*Citrullus vulgaris* schrad) al potencial del agua en el suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(2): 127-133.
- Sharma B, Rao K, Vittal K, Ramakrishna Y, Umarasinghe U (2010) Estimating the potential of rainfed agriculture in India: Prospects for water productivity improvements. *Agricultural Water Management* 97(1): 23-30.
- Sreedevi PD (2002) Climatic water balance and droughts of Pageru River Basin, Cuddapah District, Andhra Pradesh. *Environmental Geology* 42: 681-689.



- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. American Geographical Society 38(1): 55-94.
- Thornthwaite CW, Mather RJ (1955) The water balance. Publications in climatology, laboratory of climatology. Centerton, NJ. 104 pp.
- Tojo SCM, César SP, Hoogenboom G (2007) Application of the CSM-CERES Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. European Journal of Agronomy 27: 165-177.
- Troll C (1958) Climatic seasons and climatic classification. Oriental Geographer 2: 141-165.
- Velázquez VG (1994) Los recursos hidráulicos del estado de Tabasco. Universidad Juárez Autónoma del Estado de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 242 pp.
- Zhiqiang W, Baoyuan L, Yan Z (2009) Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau. Journal of Geographical Sciences 19: 707-718.