

MODELOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA ZONA NORTE BANANERA DEL URABÁ ANTIOQUEÑO (COLOMBIA)

ESTIMATION MODELS FOR THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION VALUE IN THE NORTHERN BANANA ZONE OF ANTIOQUIAN URABA (COLOMBIA)

A. María Toro-Trujillo, Ramón Arteaga-Ramírez*, M. Alberto Vázquez-Peña, L. Alicia Ibáñez-Castillo

Ingeniería Agrícola y uso integral del agua. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Chapingo, Estado de México. (namariatoro@hotmail.com), (arteagar@correo.chapingo.mx), (libacas@gmail.com), (mvazquezd@correo.chapingo.mx).

RESUMEN

El método estándar para la estimación de la evapotranspiración (ET) para calcular el requerimiento de agua de los cultivos es la función usada por FAO Penman - Monteith (PM), pero utiliza variables no disponibles en la zona de estudio. Por lo tanto, se requiere una metodología que permita calcular la evapotranspiración de referencia (Eto) en la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño, Colombia. El objetivo de este estudio fue evaluar la confiabilidad para calcular la Eto de los métodos: Hargreaves y radiación (Eto-PM-Samani), con respecto al método de PM. Para estimar la radiación solar se generaron los coeficientes de Angstrom-Prescott (coeficientes de las estaciones), además con los coeficientes $a=0.25$, $b=0.50$, $a=0.2$, $b=0.52$ y $a=0.29$, $b=0.42$, y con dos métodos. La estimación de la radiación solar con los coeficientes de las estaciones ap y bp presentó los valores de la raíz del error cuadrático medio (RSME) y el error relativo (RE) más bajos, seguido del método de Frere1978. La mejor estimación de la evapotranspiración se obtuvo con EtoHS1985, ya que presentó los valores más bajos de RSME y RE y los valores más altos de R^2 , mientras los métodos EtoHargreaves y Eto-PM-Samani presentan RSME y RE similares y son mejores para el primero, y con el modelo lineal entre Eto PM y EtoHS1985 se redujo el error y tiene una $R^2>0.8$.

Palabras clave: Angstrom-Prescott, evapotranspiración, Hargreaves, Penman-Monteith.

ABSTRACT

The standard method for estimating evapotranspiration (ET) to calculate the water requirement of crops is the function used by FAO Penman - Monteith (PM), but uses variables not available in the study area. Therefore, a methodology to calculate the reference evapotranspiration (Eto) in the northern banana-growing region of Antioquian Urabá, Colombia is required. The aim of this study was to evaluate the reliability of methods Hargreaves and radiation (Eto-PM-Samani) regarding the PM method to calculate Eto. To estimate the solar radiation we generated the Angstrom-Prescott coefficients (coefficients of stations), along with the coefficients $a=0.25$, $b=0.50$, $a=0.2$, $b=0.52$ and $a=0.29$, $b=0.42$, plus two methods. The estimation of solar radiation with the coefficients of the ap and bp stations presented the lowest values of the root square mean error (RSME) and the relative error (RE), followed by the Frere 1978 method. The best estimate of evapotranspiration was obtained with EtoHS1985 because it had the lowest values of RSME and RE and the highest values of R^2 , whereas EtoHargreaves and Eto-PM-Samani methods showed similar RSME and RE and are better for the first; with the linear model between Eto PM and EtoHS1985 we reduced the error and had $R^2>0.8$.

Keywords: Angstrom-Prescott, evapotranspiration, Hargreaves, Penman-Monteith

INTRODUCTION

The estimation of evapotranspiration (ET) is necessary to calculate the water requirement of crops, climate characteristics, programming and management of water resources

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.
Recibido: septiembre, 2014. Aprobado: octubre, 2015.
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 821-836. 2015.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la evapotranspiración (ET) es necesaria para calcular el requerimiento de agua de los cultivos, la caracterización climática, la programación y la gestión de los recursos del agua (Ramírez *et al.*, 2011). La evapotranspiración se estima con modelos empíricos, semiempíricos, fisicomatemáticos y con variables meteorológicas. La elección de un método depende de la disponibilidad de los datos meteorológicos, así como de la exactitud y la precisión del modelo para una región dada (de Carvalho *et al.*, 2013).

Allen *et al.* (2006) recomiendan FAO Penman-Monteith (PM) como el único método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia. Además se han desarrollado procedimientos y recomendaciones para la utilización de PM con datos climáticos limitados, se crea una base consistente y transparente para una estandarización universal de los cálculos de los requerimientos de agua de los cultivos. Tabari *et al.* (2012) plantearon que PM presenta dos ventajas sobre otras ecuaciones: 1) se usa en el mundo sin calibraciones locales debido a sus principios físicos; 2) es un modelo bien documentado y probado con varios datos de lisímetros (Gocic y Trajkovic, 2010).

La estimación de ET con el modelo de PM tiene una limitación potencial, ya que en su mayoría las estaciones no miden la radiación solar (R_s), por lo cual se usan relaciones empíricas como la propuesta por Angstrom-Prescott (Yoder *et al.*, 2005). En Colombia hay enfoques diferentes a PM (Chiappe, 1998): la ecuación del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) que desarrolló Jaramillo (2007), los estudios hidrometeorológico realizados por Poveda *et al.* (2007); en la zona cafetera de Colombia donde se compararon PM y el Tanque tipo A, (Jaramillo, 2007); Giraldo *et al.* (2008) compararon el modelo de PM con Turc, Linacre, Hargreaves, Jensen-Haise y García y López modificada por Jaramillo (2007); Barco *et al.* (2000) estimaron a escala macro la evaporación en Colombia, con los métodos Turc, Morton, Penman, Holdridge y Budyko. En dichos estudios ningún método de la evapotranspiración mostró superioridad significativa sobre el resto, y los autores concluyen que la magnitud de los errores surge fundamentalmente de las deficiencias en los datos y la escasez de las observaciones.

(Ramírez *et al.*, 2011). Evapotranspiration is estimated by using empirical, semiempirical, physical mathematical models and meteorological variables. The selection of a method depends on the availability of meteorological data as well as the accuracy and precision of the model for a given region (de Carvalho *et al.*, 2013).

Allen *et al.* (2006) recommend FAO Penman-Monteith (PM) as the only standard method for the definition and calculation of reference evapotranspiration. Besides, procedures and recommendations are available for the use of PM with limited climate data; as well as a consistent and transparent base for the universal standardization of calculations of crop water requirements. Tabari *et al.* (2012) stated that PM has two advantages over other equations: 1) it is used in the world without local calibrations because of its physical principles; 2) it is a well-documented and tested model with several data of lysimeters (Gocic and Trajkovic, 2010).

The estimation of ET with the PM model has a potential limitation as most stations do not measure solar radiation (R_s), whereby empirical relationships are used, as proposed by Angstrom-Prescott (Yoder *et al.*, 2005). In Colombia there are different approaches to PM (Chiappe, 1998): the equation of the Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) (National Coffee Research Center), developed by Jaramillo (2007), the hydrometeorological studies by Poveda *et al.* (2007); that of the coffee region of Colombia where PM and type A tank were compared (Jaramillo, 2007); Giraldo *et al.* (2008) compared the PM model with Turc, Linacre, Hargreaves, Jensen-Haise and García y López modified by Jaramillo (2007); Barco *et al.* (2000) estimated the evaporation in Colombia at a macro scale using the Turc, Morton, Penman, Holdridge and Budyko methods. In these studies no method of evapotranspiration showed significant superiority over the rest, and the authors concluded that the magnitude of the errors resulted mostly from gaps in data and the lack of observations.

In ET estimation studies for the banana region of Urabá, Salazar (2012) found values with PM of 1242.5 mm yr⁻¹ for the Tulenapa station; Guarín (2011) with the water balances and Budget software (KU Leuven University) obtained 1136.9 mm yr⁻¹ for dry years, and 1345 mm yr⁻¹ for the wet and normal; the Agustín Codazzi Geographic Institute (IGAC) (2007a) reported annual values of 1110 mm

En los estudios de estimación de la ET para la zona bananera del Urabá, Salazar (2012) encontró valores con PM de 1242.5 mm año⁻¹ para la estación Tulenapa; Guarín (2011) con los balances hidrológicos y el software Budget (K.U. Leuven University) obtuvo 1136.9 mm año⁻¹ para años secos, y 1345 mm año⁻¹ para húmedos y normales; el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2007a) reportó valores anuales de 1110 mm para años secos, y de 1980 mm en años húmedos y normales con Thornthwaite (ET). Los estudios mencionados en la zona del Urabá no permiten determinar la variación espacial y temporal de la evapotranspiración debido a limitaciones en la disponibilidad de las variables meteorológicas para calcular el modelo PM, lo cual limita la gestión, el diseño y la planificación de los recursos hídricos. Por lo tanto, se requiere una metodología que permita obtener la evapotranspiración de referencia en la zona Norte del Urabá Antioqueño.

Así, en el presente estudio se evaluó la confiabilidad de la estimación de la evapotranspiración con respecto al método PM de los métodos Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985), radiación (Samani) y Hargreaves en Allen *et al.* (2006). Para estimar la radiación solar se usaron los coeficientes generados de la ecuación Angstrom-Prescott, por los coeficientes de Allen *et al.* (2006), Frere *et al.* (1978) y Frere y Popov (1974), y por los métodos de Samani (2000) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) (2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El estudio se realizó en la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño, entre 7° 43.779' a 8° 01.035' N, y entre 76° 36.677 y 76° 44.802 O, y entre los ríos Currulao y Apartadó; la precipitación promedio multianual fluctúa de 1600 a 3600 mm, la temperatura media multianual de 22.8 a 28.5 °C, la evapotranspiración potencial (ETP) de 1100 a 2150 mm y la altitud de 1 a 1000 m (IGAC, 2007b).

Información climatológica

La información de variables climáticas se recopiló de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y cerca de la zona de estudio, facilitada por las entidades IDEAM, Comercializadora

for dry years, and 1980 mm in wet and normal years with Thornthwaite (ET). The studies mentioned in the area of Urabá do not allow us to determine the spatial and temporal variation of evapotranspiration due to limitations in the availability of meteorological variables to calculate the PM model, thus limiting the management, design and planning of water resources. Therefore, a methodology to obtain reference evapotranspiration in the northern region of Antioquian Urabá is required.

Thus, in the present study we evaluated the reliability of the estimate of evapotranspiration with respect to the PM method of the HargreavesSamani methods (Hargreaves and Samani, 1985), radiation (Samani) and Hargreaves in Allen *et al.* (2006). To estimate the solar radiation we used the coefficients generated from the Angstrom-Prescott equation by the coefficients of Allen *et al.* (2006), Frere *et al.* (1978) and Frere and Popov (1974), and by the methods Samani (2000) and the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia (IDEAM) (2005).

MATERIALS AND METHODS

Location of the study area

The study was conducted in the northern banana-growing region of Antioquian Urabá, between 7° 43.779' and 8° 01.035' N and between 76° 36.677 and 76° 44.802 W, flanked by the rivers Currulao and Apartadó; the multi-year average rainfall ranged from 1600 to 3600 mm, the multi-year average temperature from 22.8 to 28.5 °C, the potential evapotranspiration (PET) from 1100 to 2150 mm and altitude from 1 to 1000 m (IGAC, 2007b).

Climatological information

The information of climatic variables was collected from weather stations located in and around the study area, facilitated by IDEAM entities, Comercializadora Internacional (C.I.) Banacol S.A. Within the study area there are eight stations with daily data on minimum and maximum temperatures and one with solar radiation of the visible spectrum, and out of the area there are three stations with maximum and minimum temperatures and two of these with sunshine hours (Tables 1 and 2). The study covers the period from 2006 to 2009 and we obtained the missing data of the series of maximum and minimum temperatures by using the U.S. National Weather

Internacional (C.I) Banacol S.A. Dentro de la zona de estudio hay ocho estaciones con datos diarios de temperatura mínima y máxima y una con radiación solar del espectro visible, y fuera de la zona hay tres estaciones con temperatura máxima y mínima y dos de estas con horas brillo sol (Cuadro 1 y 2). El periodo de estudio fue del 2006 al 2009 y el relleno de los datos faltantes de las series de temperatura máxima y mínima se realizó por el método U.S National Weather Service (WS) (ASCE, 1996). En la Figura 1 se presenta la distribución espacial y nombre de las estaciones utilizadas, y en los Cuadros 1 y 2 la descripción de ellas.

La radiación solar se estimó a través de la radiación solar visible y se estableció que 48 % de la radiación solar corresponde a la banda visible (0.4 a 0.7 μm) (IDEAM, 2005). Allen *et al.* (2006) sugirieron la extrapolación de la radiación bajo la siguientes consideraciones: si el tamaño de la región es pequeña, los mecanismos atmosféricos que gobiernan la precipitación y la

Service (WS) (ASCE, 1996) method. Figure 1 shows the spatial distribution and name of the stations used, and Tables 1 and 2 the description of them.

Solar radiation was estimated through the visible solar radiation and established that 48 % of solar radiation corresponds to the visible band (0.4 to 0.7 nm) (IDEAM, 2005). Allen *et al.* (2006) suggested the extrapolation of radiation under the following considerations: If the size of the region is small, the atmospheric mechanisms producing precipitation and clouds are almost identical within the parties of the region analyzed (convective processes), and the physiography of the region is almost homogeneous; differences in the relief should be minimal since they have much influence on the movement of air masses. As these conditions were met, the observed data of solar radiation on the Pista Indira station can be used at stations belonging to C.I. Banacol S.A, considering the latter as close. Data estimated from solar radiation were compared with data measured in the

Cuadro 1. Descripción de las estaciones fuera de la zona Norte del eje bananero.

Table 1. Description of stations outside the northern banana-growing area.

| Estación | Ele | Lat | Long | Precipitación | | Tmin y Tmax | | Brillo solar | |
|--------------------------------|-----|------|--------|---------------|----|-------------|---|--------------|----|
| | | | | P | A | P | A | P | A |
| Uniban [†] | 37 | 7.49 | -76.39 | 1985-2012 | 28 | 2004-2012 | 7 | 1985-2012 | 28 |
| Aeropuerto Cedros [†] | 15 | 7.49 | -76.43 | 1985-2012 | 28 | 2004-2012 | 7 | 1989-2013 | 24 |
| Turbo [†] | 1 | 8.05 | -76.42 | 1985-2012 | 28 | 2004-2012 | 7 | - | - |

Ele: elevación (msnm); Lat: latitud (grados); Long: longitud (grados); P: periodo; A: número años. Fuente que proporciona la información, IDEAM: [†]Tmin: temperatura mínima y Tmax: temperatura máxima ♦ Ele: Elevation (m); Lat: latitude (degrees); Long: length (degrees); P: period; A: number of years. Source providing information source, IDEAM: [†]Tmin: minimum temperature and Tmax: maximum temperature.

Cuadro 2. Descripción de las estaciones dentro de la zona Norte del eje bananero.

Table 2. Description of stations in the northern banana-growing area.

| Estación | Ele | Lat | Long | Precipitación | | Tmin y Tmax | | Radiación visible | |
|---------------------------|-----|------|--------|---------------|---|-------------|---|-------------------|---|
| | | | | P | A | P | A | P | A |
| Doña Ángela [‡] | 9 | 7.89 | -76.70 | 2004-2012 | 9 | 2004-2012 | 9 | - | - |
| Magdalena [‡] | 19 | 7.98 | -76.69 | 2004-2012 | 9 | 2004-2012 | 9 | - | - |
| Manzano [‡] | 23 | 7.96 | -76.64 | 2004-2012 | 9 | 2004-2012 | 9 | - | - |
| Salpicón [‡] | 23 | 7.98 | -76.66 | 2004-2012 | 9 | 2004-2012 | 9 | - | - |
| San Jacinto [‡] | 19 | 7.91 | -76.66 | 2004-2012 | 9 | 2004-2012 | 9 | - | - |
| Tapartó [‡] | 9 | 7.95 | -76.69 | 2004-2012 | 9 | 2004-2012 | 9 | - | - |
| Tarena [‡] | 9 | 7.93 | -76.69 | 2004-2012 | 9 | 2004-2012 | 9 | - | - |
| Pista Indira [†] | 23 | 7.95 | -76.70 | 2006-2009 | 4 | 2004-2009 | 4 | 2004-2009 | 4 |

Ele: elevación (msnm); Lat: latitud (grados); Long: longitud (grados); P: periodo; A: número años. Fuente que proporciona la información: C.I. Banacol S.A: [‡]IDEAM: [†]Tmin: temperatura mínima y Tmax: temperatura máxima ♦ Ele: Elevation (m); Lat: latitude (degrees); Long: length (degrees); P: period, A: number of years. Source providing information source, C.I. Banacol S.A.: [‡]IDEAM: [†]Tmin: minimum temperature Tmax: maximum temperature.

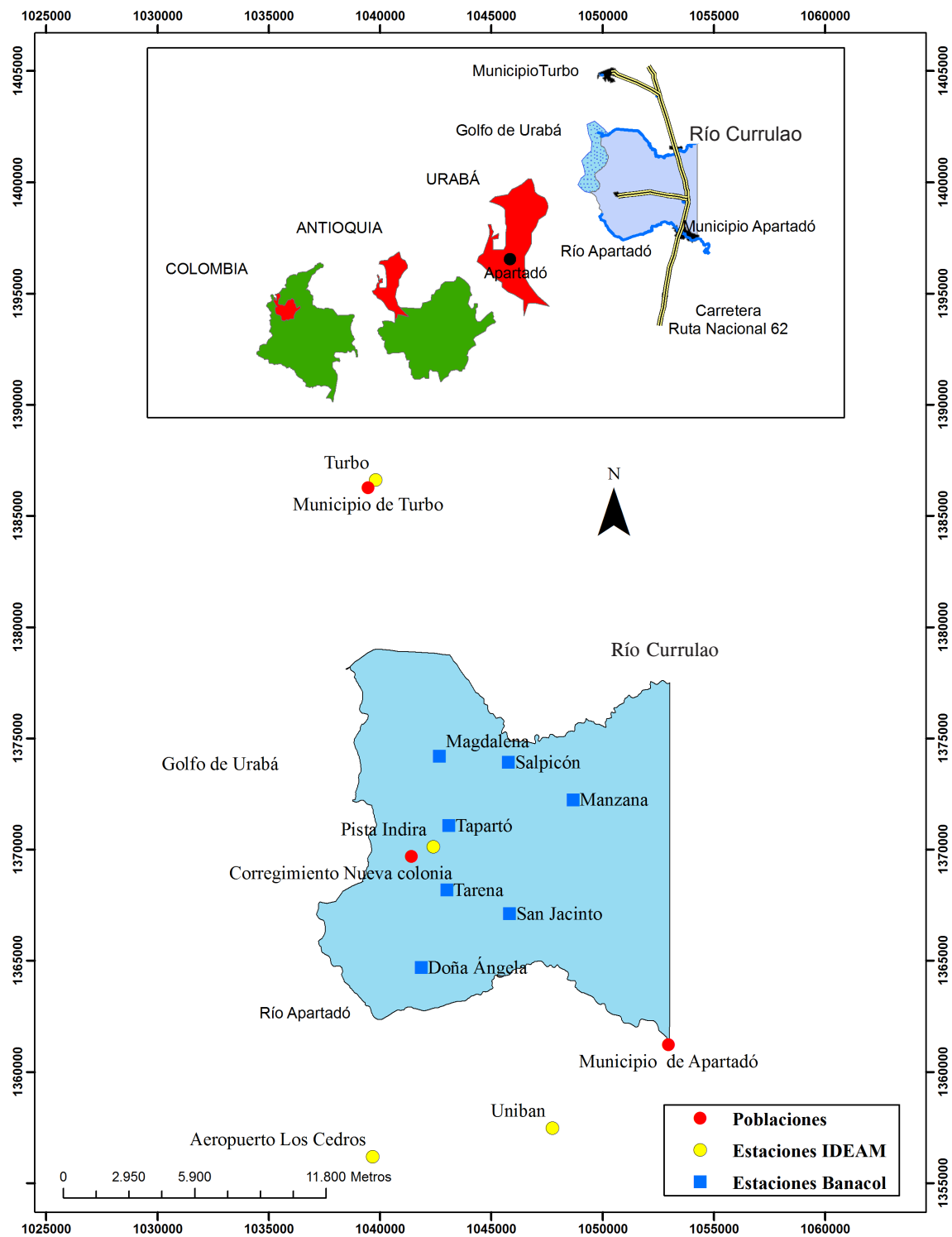


Figura 1. Ubicación de las estaciones fuera y dentro de la zona Norte del eje bananero del Urabá Antioqueño.
Figure 1. Location of the stations inside and outside the northern banana-growing area of Urabá, Antioquia.

nubosidad son casi idénticos dentro de las partes analizadas de la región (procesos convectivos) y la fisiografía de la región es casi homogénea, las diferencias en el relieve deben ser mínimas ya que tienen mucha influencia en el movimiento de las masas de aire. Dado que tales condiciones se cumplen, los datos observados de radiación solar en la estación Pista Indira se pueden usar en las estaciones pertenecientes a C.I. Banacol. S.A al considerar a estas últimas como cercanas. Los datos estimados de la radiación solar se compararon con los datos medidos en la estación Pista Indira pues la diferencia en latitud no es mayor en ningún caso a 0° 6' 9" y altitud menor de 23 m.

Estimación de los coeficientes a y b de la ecuación de Angstrom-Prescott

La radiación solar de la estación Pista Indira en las estaciones Uniban y Aeropuerto fue utilizada acorde con lo recomendado por Allen *et al.* (2006). Con la duración real del brillo solar (n) de cada una se utilizó el modelo de Angstrom-Prescott para generar los coeficientes a y b como se presenta en la siguiente expresión:

$$\frac{R_s}{R_a} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

donde R_s : radiación solar incidente [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] (Pista Indira), R_a : radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], n: duración real del brillo solar [h], N: máxima duración posible de luz solar o fotoperiodo [h] de las estaciones Uniban y Aeropuerto. Los coeficientes a y b se denominaron a_p y b_p (coeficientes Angstrom-Prescott de las estaciones Uniban o Aeropuerto o ambas).

Estimación de la radiación solar

Para la estación Uniban y Aeropuerto se utilizaron los métodos Angstrom-Prescott reportados en Angstrom (1924) y Prescott (1940) y los propuestos por Samani (2000) e IDEAM (2005) para la estimación de la radiación solar, los dos primeros recomendados por Allen *et al.* (2006).

El método propuesto por Samani (2000) es:

$$R_{ssamani} = R_a * kt * (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} \quad (2)$$

donde $R_{ssamani}$: radiación solar incidente [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], R_a : radiación solar extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], kt: coeficiente empírico [$^{\circ}\text{C}^{-0.5}$], T_{\max} : temperatura diaria máxima [$^{\circ}\text{C}$], y T_{\min} : temperatura diaria mínima [$^{\circ}\text{C}$]. El coeficiente kt de la expresión (2) es empírico a partir de los datos de presión atmosférica, pero Hargreaves (citado por Samani, 2000) recomendó un kt: 0.162 para las regiones del interior y un kt: 0.19 para las regiones costeras, de modo que se utilizó este último.

Pista Indira station since the difference in latitude is not greater in any case than 0° 6' 9" and altitude lower than 23 m.

Estimation of coefficients a and b of the Angstrom-Prescott equation

Solar radiation at the Pista Indira station in Uniban and Airport stations was used as recommended by Allen *et al.* (2006). With the actual duration of sunshine (n) of each one we used the model Angstrom-Prescott to generate coefficients a and b as shown in the following expression:

$$\frac{R_s}{R_a} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (1)$$

where R_s : incident solar radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$] (Pista Indira), R_a : extraterrestrial radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], n: actual duration of sunshine [h], N: maximum possible length of solar light or photoperiod [h] of the Uniban and Airport stations. Coefficients a and b were called a_p and b_p (Angstrom-Prescott coefficients of Uniban or Airport or both stations).

Solar radiation estimation

For stations Uniban and Airport we used the methods Angstrom-Prescott as reported by Angstrom (1924) and Prescott (1940), and those proposed by Samani (2000) and IDEAM (2005) for estimating solar radiation, the first two recommended by Allen *et al.* (2006).

The method proposed by Samani (2000) is:

$$R_{ssamani} = R_a * kt * (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} \quad (2)$$

where $R_{ssamani}$: incident solar radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], R_a : extraterrestrial solar radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], kt: empirical coefficient [$^{\circ}\text{C}^{-0.5}$], T_{\max} : daily maximum temperature [$^{\circ}\text{C}$], y T_{\min} : daily minimum temperature [$^{\circ}\text{C}$]. Coefficient kt of expression (2) is empirical based on atmospheric pressure data, but Hargreaves (cited by Samani, 2000) recommended a kt: 0.162 for the interior regions and a kt: 0.19 for coastal regions, so we used the latter.

The Angstrom-Prescott method proposed by Angstrom (1924) and Prescott (1940) is:

$$R_{sAngstrom} = \left(a + b * \left(\frac{n}{N} \right) \right) * R_a \quad (3)$$

where $R_{sAngstrom}$: incident solar radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], n: actual length of sunshine [h], N: maximum possible duration of

El método Angstrom- Prescott propuesto Angstrom (1924) y Prescott (1940) es:

$$Rs_{Angstrom} = \left(a + b * \left(\frac{n}{N} \right) \right) * Ra \quad (3)$$

donde $Rs_{Angstrom}$: radiación solar incidente [$MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$], n : duración real del brillo solar [h], N : máxima duración posible de la luz solar o fotoperiodo [h], n / N : duración relativa del brillo solar, Ra : radiación extraterrestre [$MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$].

Para este modelo se evaluaron los coeficientes recomendados por Allen *et al.* (2006) y Doorenbos y Pruitt (1977) ($a=0.25$ $b=0.5$); los sugeridos por Frere *et al.*, (1978) para la zona tropical húmeda de la zona andina ($a=0.29$ y $b=0.42$); los planteados por Frere y Popov (1974) y denominado Freregráfico1974 determinados desde la relación (n/N anual) para Uniban (0.36) y Aeropuerto (0.42), con valores de ($a=0.2$ y $b=0.52$) para Uniban y para Aeropuerto de ($a=0.22$ y $b=0.48$) y también se evaluaron los coeficientes de las estaciones (ap y bp) generados con la expresión (1).

El método del IDEAM (2005) se evaluó con la expresión:

$$Rs_{IDEAM} = \frac{Rs_{Angstrom}}{Ra} = \left(0.3429014 + 0.2437401 * \left(\frac{n}{N} \right) + 0.1129569 * \left(\frac{n}{N} \right)^2 - 0.0265681 * \left(\frac{n}{N} \right)^3 \right) \quad (4)$$

donde Rs_{IDEAM} : radiación solar incidente [$MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$], n : duración real del brillo solar [h], N : máxima duración posible de la luz solar o fotoperiodo [h], n / N : duración relativa del brillo solar.

Determinación de la evapotranspiración de referencia

Esta determinación se realizó en dos etapas: 1) la estimación de modelos con las cuatro estaciones pertenecientes al IDEAM, la única que está dentro de la zona de estudio es Pista Indira (Cuadro 1 y 2) y; 2) se utilizaron las siete estaciones dentro de la zona de estudio pertenecientes a C.I. Banacol S.A (Cuadro 2). En ambas etapas se usaron los métodos:

Hargreaves y Samani (1985) se estimó con la expresión:

$$Eto_{HS1985} = 0.0135 * (T_{media} + 17.78) * R_s \quad (5)$$

donde Eto_{HS1985} = evapotranspiración referencia diaria ($mm \ d^{-1}$), T_{media} = temperatura media ($^{\circ}C$), R_s = radiación solar incidente ($mm \ d^{-1}$).

sunshine or photoperiod [h], n / N : relative duration of sunshine, R_a : extraterrestrial radiation [$MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$].

For this model we evaluated the coefficients recommended by Allen *et al.* (2006) and Doorenbos and Pruitt (1977) ($a = 0.25$ $b = 0.5$); those suggested by Frere *et al.*, (1978) for the humid tropics in the Andean region ($a = 0.29$ and $b = 0.42$); those posed by Frere and Popov (1974) and called Freregráfico1974 determined from the ratio (annual n / N) for Uniban (0.36) and Airport (0.42), with values of ($a = 0.2$ and $b = 0.52$) for Uniban, and for Airport ($a = 0.22$ and $b = 0.48$); we also evaluated the coefficients of the stations (ap and bp) that were generated with expression (1).

The IDEAM method (2005) was evaluated with the following expression:

$$Rs_{IDEAM} = \frac{Rs_{Angstrom}}{Ra} = \left(0.3429014 + 0.2437401 * \left(\frac{n}{N} \right) + 0.1129569 * \left(\frac{n}{N} \right)^2 - 0.0265681 * \left(\frac{n}{N} \right)^3 \right) \quad (4)$$

where Rs_{IDEAM} : incident solar radiation [$MJ \ m^{-2} \ d^{-1}$], n : actual duration of sunshine [h], N : maximum possible duration of sun light or photoperiod [h], n / N : relative duration of sunshine.

Determination of reference evapotranspiration

It was conducted in two stages: 1) the estimation of models with the four stations belonging to IDEAM; the only one within the study area is Pista Indira (Tables 1 and 2), and 2) we used the seven stations in the study area belonging to C.I. Banacol S.A. (Table 2). In both stages the methods used were:

Hargreaves and Samani (1985) estimation with the following expression:

$$Eto_{HS1985} = 0.0135 * (T_{media} + 17.78) * R_s \quad (5)$$

where Eto_{HS1985} : daily reference evapotranspiration ($mm \ d^{-1}$), T_{media} : average temperature ($^{\circ}C$), R_s : incident solar radiation ($mm \ d^{-1}$).

Hargreaves is an alternative method for calculating Eto proposed by Allen *et al.* (2006); its expression is:

$$Eto_{Hargreaves} = 0.0023 * R_a * (T_{media} + 17.78) * (T_{max} - T_{min})^{1/2} \quad (6)$$

Hargreaves es un método alternativo para el cálculo de Eto propuesto por Allen *et al.* (2006) y su expresión es:

$$EtoHargreaves = 0.0023 * Ra * (Tmedia + 17.78) * (Tmax - Tmin)^{1/2} \quad (6)$$

donde EtoHargreaves: evapotranspiración referencia diaria (mm d⁻¹), Tmedia: temperatura media (°C), Tmax: temperatura máxima (°C), Tmin: temperatura mínima (°C), Ra: radiación extraterrestre (mm d⁻¹).

El método Penman Monteith (PM) es:

$$Et_oPM = \frac{0.408 * (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)} \quad (7)$$

donde Et_oPM : evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹), R_n : radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹), G: flujo de calor de suelo (MJ m⁻² d⁻¹), T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C), u_2 : velocidad del viento a 2m de altura (m s⁻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), Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹), γ : constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Por ser a escala diaria el valor G=0 para el cultivo de referencia (Allen *et al.* 2006). Los datos de velocidad del viento reportados por IDEAM (2005) se usaron cada mes; para las estaciones dentro y fuera de la zona de estudio se usó la radiación solar medida en la estación Pista Indira, como lo sugiere Allen *et al.* (2006). Además se implementó la estimación de la presión de vapor actual por la ausencia de la temperatura de rocío, como lo indican Allen *et al.* (2006).

Así mismo se evaluó el método PM con la radiación solar estimada por Samani (2000) según la ecuación (2), y se denotó como Eto-PM-Samani, y también se utilizó el mejor método de estimación de la radiación y se consideró en el método PM.

Modelo de regresión lineal

Acorde a lo recomendado por Allen *et al.* (2006) se realizó para las estimaciones de Eto un diagrama de dispersión para definir su relación con el método EtoPM a través de los siguientes modelos lineales:

$$EToPM = a + b * EToHargreaves \quad (8)$$

$$EToPM = a + b * EToHS1985 \quad (9)$$

$$EToPM = a + b * ETo-PM-Samani \quad (10)$$

where EtoHargreaves: daily reference evapotranspiration (mm d⁻¹), Tmedia: average temperature (°C), Tmax: maximum temperature (°C) Tmin: minimum temperature (°C), Ra: extraterrestrial radiation (mm d⁻¹).

The Penman Monteith (PM) method is:

$$Et_oPM = \frac{0.408 * (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)} \quad (7)$$

where Et_oPM : reference evapotranspiration (mm day⁻¹), R_n : net radiation at the crop surface (MJ m⁻² d⁻¹), G: soil heat flux (MJ m⁻² d⁻¹) T: average air temperature at 2 m height (°C), u_2 : wind speed at 2 m height (m s⁻¹) e_s : saturation vapor pressure (kPa), e_a : actual vapor pressure (kPa), $e_s - e_a$: vapor pressure deficit (kPa), Δ : slope of the vapor pressure curve (kPa °C⁻¹), γ : psychrometric constant (kPa °C⁻¹).

Since it is at the daily scale the value of G=0 for the reference crop, (Allen *et al.*, 2006). The wind speed data reported by IDEAM (2005) were used each month; for stations inside and outside the study area we used solar radiation measured at the Pista Indira station, as suggested by Allen *et al.* (2006). In addition we estimated the current vapor pressure resulting from the absence of dew temperature, as indicated by Allen *et al.* (2006).

We also evaluated the PM method with the solar radiation estimated by Samani (2000) according to equation (2), and was expressed as Eto-PM-Samani; and we used as well the best method to estimate radiation which was considered in the PM method.

Linear regression model

In line with the recommendation by Allen *et al.* (2006), for Eto estimates we did a scatterplot to define its relationship with the EtoPM method through the following linear models:

$$EToPM = a + b * EToHargreaves \quad (8)$$

$$EToPM = a + b * EToHS1985 \quad (9)$$

$$EToPM = a + b * ETo-PM-Samani \quad (10)$$

Comparison statistics

For the comparison of models we used the root mean square error (RSME) (Stöckle *et al.*, 2004; Teegavarapu and Chandramouli, 2005; Rivas and Carmona, 2010); the coefficient of determination (R^2) (Stöckle *et al.*, 2004; Teegavarapu and

Estadísticos de comparación

Para comparar de los modelos se usaron los estadísticos la raíz del error cuadrático medio (RSME) (Stöckle *et al.*, 2004; Teegavarapu y Chandramouli, 2005; Rivas y Carmona, 2010); el coeficiente de determinación (R^2) (Stöckle *et al.*, 2004; Teegavarapu y Chandramouli, 2005); y el error relativo (RE) (Rivas y Carmona, 2010). El porcentaje (%) de reducción se implementó para encontrar la disminución en la RSME antes y después de aplicar el modelo lineal con PM (Tabari *et al.*, 2013). También se realizó la regresión lineal entre los valores medidos de radiación solar en la estación Pista Indira y los estimados por los métodos de radiación, y entre los valores de EtoPM de cada estación con los otros métodos de ET para comparar los valores medidos (subestimación o sobreestimación) (Ortega-Farias *et al.*, 2006; Ramírez *et al.*, 2011). El modelo considerado tenía un ajuste aceptable fue aquél que presentó valores de $RE \leq 20\%$ y $R^2 > 0.8$ (Stöckle *et al.*, 2004; Cai *et al.*, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de los coeficientes a y b de la ecuación de Angstrom-Prescott

Los coeficientes a_p y b_p de Angstrom-Prescott obtenidos para la estación Uniban son 0.352 y 0.4458 respectivamente y para la estación Aeropuerto son 0.339 y 0.4174. Estos valores son cercanos a los reportados por Frere *et al.* (1978).

Determinación de la radiación solar

En el Cuadro 3 se presentan los estadísticos utilizados para definir de los seis métodos cual estimó adecuadamente a la radiación solar. Al considerar el RSME el mejor fue el que utilizó los coeficientes de las estaciones (a_p , b_p), ya que tiene el valor menor en las dos estaciones. Le siguieron los métodos de Frere (1978) y del IDEAM con valores muy semejantes en ambas estaciones.

Respecto al RE el método que cumple lo recomendado por Cai *et al.* (2007) en las dos estaciones es el que usó los coeficientes a_p y b_p . En la estación Aeropuerto también lo cumplen, como lo indican Frere (1978), Doorenbos y Pruitt e IDEAM.

Al considerar la R^2 la mayoría de los métodos tienen valores muy semejantes; la excepción es el de Samani con el valor más pequeño.

Chandramouli, 2005); and the relative error (RE) (Rivas and Carmona, 2010). The percent (%) reduction was implemented to find the decrease in RSME before and after applying the linear model with PM (Tabari *et al.*, 2013). We performed the linear regression between the measured solar radiation values at the Pista Indira station and those estimated by the methods of radiation, and between the EtoPM values of each station with the other ET methods to compare the values measured (under- or overestimation) (Ortega-Farias *et al.*, 2006; Ramírez *et al.*, 2011). The model considered having an acceptable adjustment was that showing values of $RE \leq 20\%$ and $R^2 > 0.8$ (Stöckle *et al.*, 2004; Cai *et al.*, 2007).

RESULTS AND DISCUSSION

Estimation of coefficients a and b of the Angstrom-Prescott equation

The a_p and b_p Angstrom-Prescott coefficients obtained for the Uniban station are 0.352 and 0.4458 respectively and for the Airport station are 0.339 and 0.4174. These values are close to those reported by Frere *et al.* (1978).

Determination of solar radiation

Table 3 shows the statistics used to define which of the six methods properly estimated solar radiation. On considering RSME the best method was that using station coefficients (a_p , b_p), since it had the lowest value in the two stations, followed by methods Frere (1978) and IDEAM with very similar values in both stations.

With respect to RE, the method that meets the recommendations made by Cai *et al.* (2007) in the two stations is the one that used coefficients a_p and b_p . Also at the Airport station, as recommended by Frere (1978), Doorenbos and Pruitt and IDEAM.

When considering the R^2 most methods have very similar values, being the exception that by Samani with the smallest value.

The method proposed by Samani showed low values of R^2 , high RSME and the values of intercept and slope appear to be the farthest from zero and one; therefore, it is the furthest away from the measured values; and in humid locations it does not properly estimate radiation (Oliveira *et al.*, 2005). From the results obtained, we chose to use the coefficients $a=0.29$ and $b=0.42$ by Frere

Cuadro 3. Estimación de la radiación solar y sus estadísticos de verificación en la comparación de los distintos métodos usados para calcularla en la zona Norte de Urabá, Colombia.**Table 3. Estimation of solar radiation and verification statistics when comparing the different methods used in its calculation in the northern region of Urabá, Colombia.**

| | Estación | Samani | Angstrom-Prescott | | | | IDEAM |
|----------------|------------|--------|-------------------|---------------|-----------------------|-------------------------------|---------|
| | | | Frere 1978 | Frere 1974 | Doorenbos y Pruitt | Coefficientes 1 estaciones | |
| Coefficiente | | | a=0.29 b=0.42 | a=0.2 b=0.52 | a=0.25 b=0.50 | ap=0.352 bp=0.4458 | |
| RSME | | 98.99 | 89.91 | 125.84 | 96.89 | 68.44 | 89.16 |
| RE | | 23% | 24% | 38% | 26% | 15% | 23% |
| R ² | Uniban | 0.1357 | 0.498 | 0.5235 | 0.5126 | 0.4454 | 0.4622 |
| a | | 386.38 | 150.66 | 46.101 | 95.266 | 204.400 | 215.900 |
| b | | 0.1896 | 0.5206 | 0.6536 | 0.6225 | 0.5498 | 0.3833 |
| Coefficiente | | Samani | a=0.29 b=0.42 | a=0.22 b=0.48 | a=0.25 b=0.50 | ap=0.339 bp=0.417 | |
| RSME | | 99.27 | 75.53 | 101.74 | 80.18 | 64.73 | 76.95 |
| RE | | 23% | 19% | 28% | 20% | 15% | 19% |
| R ² | Aeropuerto | 0.133 | 0.544 | 0.559 | 0.557 | 0.501 | 0.520 |
| a | | 390.11 | 136.880 | 58.264 | 79.046 | 180.780 | 201.130 |
| b | | 0.1898 | 0.599 | 0.690 | 0.718 | 0.592 | 0.454 |

RSME: Raíz del error cuadrático medio ($\text{cal cm}^{-2}\text{d}^{-1}$); R²: Coeficiente de determinación; RE: Error relativo, a ($\text{cal cm}^{-2}\text{d}^{-1}$) y b (adimensional) coeficientes de regresión lineal ♦ RSME: root mean square error ($\text{cal cm}^{-2}\text{d}^{-1}$); R² coefficient of determination; RE: Relative error, a ($\text{cal cm}^{-2}\text{d}^{-1}$) and b (dimensionless) linear regression coefficients.

El método propuesto por Samani presentó valores bajos de R², RSME altos y los valores de intercepto y pendiente más alejados a cero y la unidad; en consecuencia es el que más se aleja de los valores medidos y se determina que para zonas húmedas no estima adecuadamente la radiación (Oliveira *et al.*, 2005). Con los resultados obtenidos se optó por utilizar los coeficientes a=0.29 y b=0.42 de Frere *et al.* (1978) para calcular la radiación e implementarla en el cálculo de la evapotranspiración, ya que su calibración se realizó con un mayor número de registros, estaciones y variedad de condiciones topográficas, y en nuestro estudio mostró similitud con los coeficientes ap y bp e incluso presenta valores de R² ligeramente más grandes, lo que indica la amplia aplicación de los coeficientes de Frere *et al.* (1978) y su utilización para la zona del Urabá.

Determinación de la evapotranspiración de referencia

Para determinar el mejor método de estimación de la ET se usaron las estaciones pertenecientes al IDEAM en la primera etapa y en la segunda se usaron las siete estaciones que están dentro de la zona de estudio pertenecientes a C. I. Banacol S. A. Dado que

et al. (1978) to calculate radiation and apply it in calculating evapotranspiration, since we performed its calibration with a larger number of records, stations and variety of topographical conditions, and in our study showed similarity with coefficients ap and bp and even recorded R² values slightly greater, indicating the broad application of the coefficients by Frere *et al.* (1978) and their use in the area of Urabá.

Determination of reference evapotranspiration

To determine the best method for estimating ET we used the stations belonging to IDEAM in the first stage, and in the second the seven stations located within the study area belonging to C.I. Banacol S.A. Since the method proposed by Frere *et al.* (1978) presented the best estimate of radiation we used it to calculate evapotranspiration with the PM method and called it Eto-PM-Rsfrere in the first stage.

Stage 1: outside the study area

To define which of the four methods best estimated reference evapotranspiration by PM, Table 4 shows the statistics obtained by each method

el método planteado por Frere *et al.* (1978) presentó la mejor estimación de radiación, se usó para calcular la evapotranspiración con el método PM y se denominó Eto-PM-Rsfrere en la primer etapa.

Etapa 1: fuera de la zona de estudio

Para definir de los cuatro métodos cual estimó mejor la evapotranspiración de referencia por PM, en el Cuadro 4 se presentan los estadísticos obtenidos por método y estación. EtoHS1985 se define como el mejor en la mayoría de las estaciones; la excepción es la estación Pista Indira que tiene el mayor RSME y el valor de RE es casi 3 % mayor al criterio propuesto por Cai *et al.* (2007), pero con base a los otros estadísticos (R^2 , a y b) se considera aceptable. Le sigue el método de Eto-PM-RsFrere, luego Eto-PM-Samani y el último EtoHargreaves.

El método EtoHS1985 fue el mejor porque usó la radiación solar medida que es un componente importante del término energético de PM, lo cual concuerda con lo encontrado por Tabari *et al.* (2012). Los valores de RE de todos los métodos y estaciones son menores a los reportados por Hargreaves y Allen (2003).

and station. EtoHS1985 is defined as the best in most stations; the exception is the Pista Indira station having the largest RSME and the RE value is almost 3 % higher than the criterion proposed by Cai *et al.* (2007), but based on other statistics (R^2 , a and b) is considered acceptable. The Eto-PM-RsFrere method followed, then EtoPM-Samani and the last was EtoHargreaves.

The EtoHS1985 was the best method because it used measured solar radiation which is an important component of the energy term of PM, which is consistent with the findings by Tabari *et al.* (2012). The RE values of all the methods and stations are lower than those reported by Hargreaves and Allen (2003).

The RSME values in the EtoHargreaves method are greater than those found by Tabari *et al.* (2013) of 0.34 mm d^{-1} , but lower than that reported by Tabari *et al.* (2012) of 0.91 mm d^{-1} , and are in the range of $1.04 - 0.4 \text{ mm d}^{-1}$ obtained by Gavilán *et al.* (2006).

Table 4 shows the values of the regression coefficients a and b, which in the case of the EtoHS1985 method in all the stations are the closest to zero and one, respectively. Slope (b) is greater than one at all stations indicating an overestimation

Cuadro 4. Comparación estadística de los métodos de evapotranspiración de las estaciones de la etapa 1.

Table 4. Statistical comparison of evapotranspiration methods of stations in stage 1.

| Estación | Método | RSME | RE | R^2 | b | a |
|--------------|----------------|------|--------|-------|-------|--------|
| Aeropuerto | EtoHS1985 | 0.30 | 6.612 | 0.95 | 1.201 | -.0834 |
| Uniban | | 0.31 | 6.742 | 0.94 | 1.199 | -0.815 |
| Pista Indira | | 1.05 | 22.832 | 0.93 | 1.176 | -0.731 |
| Turbo | | 0.34 | 7.47 | 0.95 | 1.271 | -1.098 |
| Aeropuerto | EtoHargreaves | 0.68 | 15.417 | 0.35 | 0.351 | 2.852 |
| Uniban | | 0.68 | 15.507 | 0.35 | 0.348 | 2.845 |
| Pista Indira | | 0.69 | 15.549 | 0.35 | 0.379 | 2.741 |
| Turbo | | 0.73 | 16.613 | 0.18 | 0.237 | 3.314 |
| Aeropuerto | Eto-Pm-Samani | 0.71 | 14.937 | 0.40 | 0.445 | 2.738 |
| Uniban | | 0.71 | 15.021 | 0.39 | 0.447 | 2.726 |
| Pista Indira | | 0.73 | 15.252 | 0.39 | 0.455 | 2.592 |
| Turbo | | 0.76 | 16.198 | 0.21 | 0.305 | 3.314 |
| Aeropuerto | Eto-PM-RsFrere | 0.55 | 13.169 | 0.69 | 0.729 | 0.931 |
| Uniban | | 0.65 | 14.547 | 0.66 | 0.657 | 1.108 |

RSME: Raíz del error cuadrático medio (mm d^{-1}); R^2 : Coeficiente de determinación; RE: Error relativo (%), a (intercepto, mm d^{-1}) y b (pendiente, adimensional) coeficientes de regresión lineal ♦ RSME: Root mean square error (mm d^{-1}); R^2 : Coefficient of determination; RE: Relative error (%), a (intercept, mm d^{-1}) and b (slope, dimensionless) linear regression coefficients.

Los valores de RSME en el método de EtoHargreaves son mayores al encontrado por Tabari *et al.* (2013) de 0.34 mm d^{-1} , pero inferiores al reportado por Tabari *et al.* (2012) de 0.91 mm d^{-1} y están en el rango de $1.04 - 0.4 \text{ mm d}^{-1}$ obtenido por Gavilán *et al.* (2006).

En el Cuadro 4 están los valores de los coeficientes de regresión a y b, que en el caso del método EtoHS1985 en todas las estaciones son los más cercanos a cero y a la unidad, respectivamente. La pendiente (b) es mayor a la unidad en todas las estaciones lo cual indica una sobreestimación a partir de 4 mm d^{-1} , lo que concuerda con Raziei y Pereira (2013b) en zonas húmedas, y se debe a que este método utiliza la radiación solar medida.

Los valores de b obtenidos con EtoHargreaves en todas las estaciones son menores a la unidad, lo cual indica una subestimación de la evapotranspiración y no concuerda con lo determinado por Tabari *et al.* (2012), Hargreaves y Allen (2003), Raziei y Pereira (2013a) y Gavilán *et al.* (2006), quienes reportan una sobreestimación de 15 %, 25 %, 10 % y 9 %, respectivamente.

Los valores de la pendiente (b) y de la ordenada al origen (a) definidos con Eto-Pm-RsFrere son cercanos a la unidad y a cero, respectivamente. Esto se debe a que para estimar la radiación solar este método utilizó los coeficientes calibrados para la zona (coeficientes de las estaciones, ap y bp) que permiten disminuir la incertidumbre en el cálculo de EtoPM (Liu *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2011).

Modelo lineal

En el Cuadro 5 se presentan los estadísticos obtenidos para la regresión lineal entre los métodos de estimación de Eto y el método PM.

EtoHS1985 presenta mejoras en los valores de RMSE y RE, ya que disminuyen con respecto a los del Cuadro 4. En especial la estación Pista Indira, ya que de un RSME de 1.05 se reduce a 0.22 mm d^{-1} y el RE de 22.83 pasa a 4.89 %. Los valores de R^2 permanecen iguales en las cuatro estaciones y los valores de a y b son los mismos en tres estaciones, solo Turbo presenta valores diferentes.

En el método EtoHargreaves el RMSE es el mismo en tres estaciones y en la otra se reduce una centésima. El valor de RE en las cuatro estaciones disminuyó poco con respecto a los del Cuadro 4. La R^2

from 4 mm d^{-1} , consistent with Raziei and Pereira (2013b) in humid locations, and is so because this method uses measured solar radiation.

The b values obtained with EtoHargreaves at all stations are less than one, indicating an underestimation of evapotranspiration and do not match with the findings by Tabari *et al.* (2012), Hargreaves and Allen (2003), Raziei and Pereira (2013a) and Gavilán *et al.* (2006), who reported an overestimation of 15 %, 25 %, 10 % and 9 %, respectively.

The values of slope (b) and intercept (a) defined with Eto-Pm-RsFrere are close to one and zero, respectively. This is because to estimate solar radiation this method used coefficients calibrated for the area (coefficients of the stations, ap and bp) that help reduce uncertainty in the calculation of EtoPM (Liu *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2011).

Linear model

Table 5 shows the statistics obtained for the linear regression between the estimation methods of Eto and the PM method.

Cuadro 5. Estadísticos modelo de regresión lineal con intercepto entre los métodos de evapotranspiración y PM de las estaciones de la etapa 1.

Table 5. Statistical linear regression model with intercept between methods of evapotranspiration and PM in stations during stage 1.

| Estación | Método | RSME | RE | R^2 | b | a |
|--------------|---------------|------|------|-------|------|------|
| Aeropuerto | EtoHS1985 | 0.19 | 4.3 | 0.95 | 0.79 | 0.89 |
| Uniban | | 0.20 | 4.0 | 0.94 | 0.79 | 0.89 |
| Pista Indira | | 0.22 | 4.9 | 0.93 | 0.79 | 0.89 |
| Turbo | | 0.19 | 4.2 | 0.95 | 0.74 | 1.06 |
| Aeropuerto | EtoHargreaves | 0.68 | 15.1 | 0.35 | 1.01 | 0.02 |
| Uniban | | 0.68 | 15.0 | 0.35 | 1.01 | 0.04 |
| Pista Indira | | 0.69 | 15.2 | 0.35 | 0.94 | 0.35 |
| Turbo | | 0.72 | 16.1 | 0.18 | 0.77 | 1.09 |
| Aeropuerto | Eto-PM-Samani | 0.80 | 16.5 | 0.34 | 0.45 | 2.74 |
| Uniban | | 0.80 | 17.0 | 0.39 | 0.45 | 2.73 |
| Pista Indira | | 0.80 | 16.3 | 0.40 | 0.49 | 2.59 |
| Turbo | | 0.79 | 16.6 | 0.21 | 0.30 | 3.31 |

RSME: Raíz del error cuadrático medio (mm d^{-1}); R^2 : Coeficiente de determinación; RE: Error relativo (%), a (intercepto, mm d^{-1}) y b (pendiente, adimensional) coeficientes de regresión lineal ♦ RSME: Root mean square error (mm d^{-1}); R^2 : Coefficient of determination; RE: Relative Error (%), a (intercept, mm d^{-1}) and b (slope, dimensionless) linear regression coefficients.

no cambia en ninguna estación. Los valores de a y b en tres estaciones son cercanos a cero y uno, respectivamente.

Con relación al método Eto-PM-Samani, el Cuadro 5 muestra que los valores de RSME y RE aumentan con respecto a los del Cuadro 4 en 10 %, aproximadamente. El valor de R^2 en dos estaciones se conserva y en las otras dos aumenta poco. Los valores de a son los mismos del Cuadro 4, y los de b en dos estaciones se conservan y en las otras dos varían poco.

El modelo de EtoHS1985 al usar la radiación solar medida considera uno de los términos físicos para el cambio de estado del agua y el más importante y los errores iniciales que presenta, según Hargreaves y Allen (2003), se deben a la variación del viento y a la presencia de nubes que están fuertemente influenciados por la topografía local y la advección regional. Con el ajuste al modelo lineal se reducen los errores y se tiene una relación alta con la estimación de EtoPM (Allen *et al.*, 2006).

El método de EtoHargreaves no presenta mejoras con el ajuste al modelo lineal, contrario a lo encontrado por Galván *et al.* (2006) que con el ajuste tienen una reducción de 22 %, mientras que Tabari *et al.* (2013) presenta un RSME de 0.67 mm d⁻¹ antes del ajuste y después se reduce a 0.34 mm d⁻¹.

Los métodos EtoHargreaves y Eto-PM-Samani no estiman bien la evapotranspiración, por su baja capacidad para estimar la radiación solar, ya que la variable en que se basan, la oscilación térmica ($T_{max} - T_{min}$), está fuertemente influenciada por vientos calientes y la nubosidad que son frecuentes en la zona de estudio (Hargreaves y Allen, 2003).

Etapa 2: estimación de los modelos dentro de la zona de estudio

La evapotranspiración se calculó para las siete estaciones pertenecientes a C.I. BANCOL S. A., con los métodos: EtoHS1985 y EtoHargreaves. El método Eto-PM-RsFrere no se utilizó, porque las estaciones no tienen el dato de horas brillo sol.

En el Cuadro 6 se observa que el método EtoHS1985 tiene rangos de valores de RSME entre 0.46 a 0.56 mm d⁻¹, RE de 9.7 a 12.1 %, R^2 de 0.77 a 0.91, a de -1.61 a -0.21 y b de 1.01 a 1.28. El método de EtoHargreaves obtuvo rangos de valores para: RSME de 0.84 a 0.89 mm d⁻¹, RE entre 15.9

EtoHS1985 presented improvements in the values of RMSE and RE, as they decreased in relation to Table 4; in particular the Pista Indira station since a RSME of 1.05 went down to 0.22 mm d⁻¹ and RE dropped from 22.83 to 4.89 %. The R^2 values remained the same in the four stations and the values of a and b were the same in three stations, only Turbo has different values.

In the EtoHargreaves method the RSME was the same at the three stations and the other one was a hundredth reduced. The value of RE at all four stations declined slightly from those in Table 4. The R^2 did not change in any station. The a and b values at the three stations were close to zero and one, respectively.

Regarding the Eto-PM-Samani method, Table 5 shows that the values of RSME and RE increased with respect to Table 4 by 10 % approximately. The value of R^2 remained the same in two stations and in the other two slightly increased. The values of a were the same as those in Table 4, and those of b were retained in two stations and in the other two varied a little.

By using the solar radiation measured, the EtoHS1985 model is considering one of the physical terms for changing the water status, which is the most important; and the initial errors recorded, according to Hargreaves and Allen (2003), were due to the variation of the wind and the presence of clouds that were strongly influenced by local topography and regional advection. By adjusting to the linear model, errors declined and there was a high relationship with the estimation of EtoPM (Allen *et al.*, 2006).

The EtoHargreaves method showed no improvements with the adjustment to the linear model, contrary to what was found by Galván *et al.* (2006) who recorded a reduction of 22 % with the adjustment, whereas Tabari *et al.* (2013) presented a RSME of 0.67 mm d⁻¹ before adjusting, and then dropped to 0.34 mm d⁻¹.

The EtoHargreaves and Eto-PM-Samani methods do not estimate evapotranspiration properly because of their low capacity to estimate solar radiation, since the variable they use, temperature variation ($T_{max} - T_{min}$), is strongly influenced by hot winds and clouds that are frequent in the study area (Hargreaves and Allen, 2003).

Cuadro 6. Comparación estadística de los métodos de evapotranspiración de las estaciones de la etapa 2.
Table 6. Statistical comparison of the evapotranspiration methods of stations in stage 2.

| Estación | Método | RSME | RE | R ² | b | a |
|-------------|---------------|------|------|----------------|------|-------|
| Manzana | EtoHS1985 | 0.46 | 9.7 | 0.91 | 1.23 | -1.35 |
| Magdalena | | 0.51 | 10.9 | 0.80 | 1.14 | -0.52 |
| San Jacinto | | 0.56 | 12.1 | 0.79 | 1.01 | -0.21 |
| Doña Ángela | | 0.53 | 11.5 | 0.80 | 1.08 | -0.46 |
| Salpicón | | 0.54 | 11.6 | 0.85 | 1.15 | -1.09 |
| Tapartó | | 0.53 | 11.4 | 0.77 | 1.08 | -0.46 |
| Tarena | | 0.49 | 10.5 | 0.91 | 1.28 | -1.61 |
| Manzana | EtoHargreaves | 0.85 | 17.8 | 0.19 | 0.25 | 3.52 |
| Magdalena | | 0.89 | 21.1 | 0.23 | 0.40 | 2.40 |
| San Jacinto | | 0.84 | 18.1 | 0.40 | 0.50 | 2.21 |
| Doña Ángela | | 0.86 | 19.2 | 0.31 | 0.47 | 2.29 |
| Salpicón | | 0.78 | 15.9 | 0.25 | 0.34 | 3.21 |
| Tapartó | | 0.81 | 18.1 | 0.28 | 0.45 | 2.40 |
| Tarena | | 0.81 | 17.0 | 0.15 | 0.21 | 3.73 |

RSME: Raíz del error cuadrático medio (mm d⁻¹); R²: Coeficiente de determinación; RE: Error relativo (%), a (intercepto, mm d⁻¹) y b (pendiente, adimensional) coeficientes de regresión lineal ♦ RSME: Root mean square error (mm d⁻¹); R²: Coefficient of determination; RE: Relative error (%), a (intercept, mm d⁻¹) and b (slope, dimensionless) linear regression coefficients.

a 21.1 %, R², de 0.1467 a 0.3981, a de 2.21 a 3.73 y b entre 0.21 a 0.51. Al comparar los estadísticos de ambos métodos se observa que EtoHS1985 estima mejor a los valores de EtoPM, aunque los sobreestima y EtoHargreaves los subestima.

Los valores de RSME de ambos métodos en esta segunda etapa aumentaron al compararlos con los valores obtenidos en la primera etapa (Cuadro 4).

Modelo lineal

En el Cuadro 7 se presentan los estadísticos determinados al ajustar el modelo lineal entre los datos de EtoPM y los de EtoHS1985 y EtoHargreaves para todas las estaciones de la zona de estudio consideradas en esta segunda etapa.

EtoHS1985 presenta los siguientes valores: RSME de 0.257 a 0.471 mm d⁻¹, RE de 5.3 a 9.8 %, R² varió de 0.77 a 0.91, a de 1.17 a 1.58, y b de 0.71 a 0.79. Al comparar estos valores con los del Cuadro 6 se observa que RSME y RE disminuyeron (29 %), R² presenta los mismos valores, los valores de a son mayores en valor absoluto y los de b disminuyeron.

Stage 2: estimation of models within the study area

We calculated evapotranspiration for the seven stations belonging to C.I. BANCOL S.A. with the methods: EtoHS1985 and EtoHargreaves. The Eto-PM-RsFrere method was not used because the stations do not have the sunshine hour data. Table 6 shows that the EtoHS1985 method had RSME values ranging between 0.46 and 0.56 mm d⁻¹, RE from 9.7 to 12.1 %, R² from 0.77 to 0.91, a from -1.61 to -0.21 and b from 1.01 to 1.28. The EtoHargreaves method values ranged: for RSME from 0.84 to 0.89 mm d⁻¹, RE between 15.9 and 21.1 %, R² from 0.1467 to 0.3981, a from 2.21 to 3.73, and b between 0.21 and 0.51. When comparing the statistics of both methods EtoHS1985 better estimated the EtoPM values, although it overestimated them, and EtoHargreaves did the opposite. The RSME values of both methods in this second stage increased when compared with the values obtained in the first stage (Table 4).

Cuadro 7. Estadísticos del modelo de regresión lineal con intercepto entre los métodos de evapotranspiración y PM de las estaciones de la etapa 2.

Table 7. Statistics of the linear regression model with intercept between methods of evapotranspiration and PM of stations in stage 2.

| Estación | Método | RSME | RE | R ² | b | a |
|-------------|---------------|-------|------|----------------|------|------|
| Manzana | EtoHS1985 | 0.267 | 5.5 | 0.91 | 0.74 | 1.44 |
| Magdalena | | 0.384 | 8.3 | 0.80 | 0.70 | 1.28 |
| San Jacinto | | 0.471 | 9.8 | 0.79 | 0.79 | 1.17 |
| Doña Ángela | | 0.426 | 8.8 | 0.80 | 0.74 | 1.29 |
| Salpicón | | 0.336 | 6.7 | 0.85 | 0.74 | 1.55 |
| Tapartó | | 0.438 | 9.1 | 0.77 | 0.71 | 1.43 |
| Tarena | | 0.257 | 5.3 | 0.91 | 0.71 | 1.58 |
| Manzana | EtoHargreaves | 0.803 | 16.4 | 0.19 | 0.75 | 1.34 |
| Magdalena | | 0.753 | 16.4 | 0.23 | 0.59 | 2.12 |
| San Jacinto | | 0.799 | 16.5 | 0.40 | 0.79 | 1.17 |
| Doña Ángela | | 0.788 | 16.2 | 0.31 | 0.67 | 1.68 |
| Salpicón | | 0.754 | 15.1 | 0.24 | 0.71 | 1.50 |
| Tapartó | | 0.746 | 16.1 | 0.28 | 0.64 | 1.86 |
| Tarena | | 0.791 | 16.2 | 0.15 | 0.68 | 1.61 |

RSME: Raíz del error cuadrático medio (mm d⁻¹); R²: Coeficiente de determinación; RE: Error relativo (%), a (intercepto, mm d⁻¹) y b (pendiente, adimensional) coeficientes de regresión lineal ♦ RSME: Root mean square error (mm d⁻¹); R²: Coefficient of determination; RE: Relative error (%), a (intercept, mm d⁻¹) and b (slope, dimensionless) linear regression coefficients.

Para EtoHargreaves se observó: RMSE de 0.746 a 0.803, Re de 15.1 a 16.5 %, R^2 de 0.147 a 0.398, a de 1.17 a 2.12, y b de 0.59 a 0.79. Los valores de los estadísticos para EtoHargreaves, en el Cuadro 7, comparados con los del Cuadro 6, fueron: RSME y RE son menores en 7 %, R^2 tiene los mismos valores, los de a disminuyeron y los de b aumentaron.

Para el método EtoHS1985 los valores de R^2 (mayores o iguales a 0:77) se consideran que cumplen con el criterio de Cai *et al.* (2007), pero los de EtoHargreaves no ($R^2 < 0.398$). Los valores de RE para ambos métodos son menores al 20 %, como lo proponen Cai *et al.* (2007).

CONCLUSIONES

Para la zona del Urabá el uso de los coeficientes a y b de Frere es apropiado para estimar la radiación solar, pero el método propuesto por Samani en zonas húmedas no la estimó adecuadamente.

En todas las estaciones dentro y fuera de la zona de estudio, la EtoHS1985 ajustada al modelo Penman-Monteith fue el mejor método de estimación, por lo cual se recomienda usar los coeficientes obtenidos en el ajuste lineal con PM.

Con el modelo lineal se redujo el error con excepción del método Eto-PM-Samani que aumentó en 10 % para la zona. El uso de coeficientes calibrados, como fue el caso de Eto-PM- Rsfrere, permitió disminuir el error en el cálculo de la evapotranspiración.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. N°56 Ed. FAO. Italia, Roma. 323 p.
- Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 50 (210): 121-126.
- ASCE (American Society of Civil Engineers). 1996. Hydrology Handbook. 2 ed. American Society of Civil Engineers. New York, EE.UU. 769 p.
- Barco, M. O. J., P. L. A. Cuartas, S. Ó. J. Mesa, V. J. F. Mejía, J. G. Poveda, U. J. I. Vélez, G. R. Mantilla, O. C. D. Hoyos, H. B. Botero, y C. M. I. Montoya. 2000. Estimación de la evaporación en Colombia. Avances Recursos Hidrául. (7): 43-51.
- Cai, J., Y. Liu, T. Leiy, and L. S. Pereira. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. Agric. For. Meteorol. 145 (1-2): 22-35.

Linear model

Table 7 presents the statistics determined by adjusting the linear model between the data of EtoPM and those of EtoHS1985 and EtoHargreaves for all the stations of the study area considered in this second stage.

EtoHS1985 presents the following values: RSME between 0.257 and 0.471 mm d⁻¹, RE from 5.3 to 9.8 %, R^2 from 0.77 to 0.91, a from 1.17 to 1.58, and b from 0.71 to 0.79. On comparing these values with those in Table 6 we observed that RSME and RE decreased (29 %), R^2 showed the same values, the values of a were greater in absolute terms and b decreased.

The values for EtoHargreaves were: RMSE from 0.746 to 0.803, Re between 15.1 and 16.5 %, R^2 ranged from 0.147 to 0.398, a from 1.17 to 2.12, and b from 0.59 to 0.79. The statistical values for EtoHargreaves, in Table 7, compared to those in Table 6 were: for RSME and RE they were lower by 7 %, R^2 had the same values, whereas a decreased and b increased.

For the EtoHS 1985 method the R^2 values (greater than or equal to 0:77) were considered to meet the criteria by Cai *et al.* (2007), but not those by EtoHargreaves ($R^2 < 0.398$). The RE values for both methods were less than 20 %, as proposed by Cai *et al.* (2007).

CONCLUSIONS

For the area of Urabá it was appropriate to use the coefficients a and b by Frere in estimating solar radiation, while the method proposed by Samani in humid areas failed to estimate it adequately.

In all stations within and outside the study area, the EtoHS1985 adjusted to the Penman-Monteith model was the best estimation method, whereby we recommend the use of the coefficients obtained in the linear adjustment with PM.

With the linear model we reduced the error, with the exception of the Eto-PM-Samani method that increased it by 10% for the area. The use of calibrated coefficients, as was the case with Eto-PM-Rsfrere, helped to reduce the error in the calculation of evapotranspiration.

—End of the English version—

-----*

- Chiappe, R. 1998. Técnicas de evaluación de evapotranspiración potencial y balance hídrico. *In: Manual de Evaluación de Impactos Ambientales de Colombia*. Ministerio del medio ambiente. Bogotá, Colombia. pp: 324-348.
- Carvalho A., M. de, L. de Carvalho, R. Vianello, G. Sedyama, M. de Oliveiray, and A. de Sá Junior. 2013. Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. *Theor. Appl. Climatol.* 113 (1-2): 155-174.
- Doorenbos, J., y W. Pruitt. 1977. Las Necesidades de Agua de los Cultivos. N°24 Ed. FAO Riego y Drenaje. Roma, Italia. 194 p.
- Frere, M., y G. F. Popov. 1974. Pronóstico Agrometeorológico del Rendimiento de los Cultivos Estudio FAO. 73 N° Ed. FAO Producción y Protección Vegetal. Roma, Italia. 194 p.
- Frere, M., Q. Rijsk, y J. Rea. 1978. Estudio Agroclimatológico de la Zona Andina. N° 161 Ed. OMM (Organización Meteorológica Mundial). Ginebra, Suiza. 297 p.
- Gavilán, P., I. J. Lorite, S. Tornero, y J. Berengena. 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference et in a semiarid environment. *Agric. Water Manage.* 81 (3): 257-281.
- Giraldo, J., L. Lince, A. Cuartas, y H. González. 2008. Evaluación de fórmulas empíricas para el cálculo de la evapotranspiración potencial. *Fitotecnia* 141: 1-2.
- Gocic, M., y S. Trajkovic. 2010. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Comput. Electron. Agric.* 71 (2): 158-162.
- Guarín, G. W. G. 2011. Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en el Urabá Antioqueño. Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Medellín, Colombia. 145 p.
- Hargreaves, G., and R. Allen. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129 (1): 53-63.
- Hargreaves, G. H., and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *Am. Soc. Agric. Eng.* 1 (2): 96-99.
- IDEAM (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2005. Atlas Climatológico de Colombia. Grupo de investigación en Meteorología y climatología. Bogotá, Colombia. 217 p.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007a. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras Departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 922 p.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2007b. Estudio Semidetallado de Suelos de las Áreas Potencialmente Agrícolas. Urabá departamento de Antioquia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 489 p.
- Jaramillo, A. 2007. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé* 57 (4): 288-298.
- Liu, X., X. Mei, Y. Li, Q. Wang, Y. Zhang, and J. R. Porter. 2009. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Ångström-Prescott coefficient: Locally calibrated versus the FAO recommended. *Agric. Water Manage.* 96 (7): 1137-1145.
- Oliveira, R. Z., L. F. Coutinho de Oliveira, H. R. Wehr, and L. B. Borges. 2005. Comparative study estimation models for reference evapotranspiration for the region Goiania, Go. *Bioscience J.* 21 (3): 19-23.
- Ortega-Farías, S. O., A. Oliso, S. Fuentes, and H. Valdes. 2006. Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman-Monteith equation with a variable surface canopy resistance. *Theor. Appl. Climatol.* 82 (3): 421-432.
- Poveda, G., J. I. Vélez, O. J. Mesa, A. Cuartas, J. Barco, R. I. Mantilla, J. F. Mejía, C. D. Hoyos, J. M. Ramírez, and L. I. Ceballos. 2007. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *J. Hydrol. Eng.* 12 (1): 4-13.
- Prescott, J. A. 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Roy. Soc. South Aust.* 64: 114-118.
- Rahimikhoob, A. 2010. Estimation of evapotranspiration based on only air temperature data using artificial neural networks for a subtropical climate in Iran. *Theor. Appl. Climatol.* 101 (1-2): 83-91.
- Ramírez, V. H., A. Mejía, E. V. Marín, y R. Arango. 2011. Evaluation of models for estimating the reference evapotranspiration in colombian coffee zone. *Agron. Colomb.* 29 (1): 107-114.
- Raziei, T., and L. S. Pereira. 2013a. Estimation of Eto with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agric. Water Manage.* 121: 1-18.
- Raziei, T., and L. S. Pereira. 2013b. Spatial variability analysis of reference evapotranspiration in Iran utilizing fine resolution gridded datasets *Agric. Water Manage.* 126: 104-118.
- Rivas, R., y F. Carmona. 2010. La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: Una alternativa para estudios detallados de cuencas. *Bol. Geol. Minero* 121 (4): 401-412.
- Salazar, M. C. A. 2012. Los Sistemas Agrícolas en el Cultivo del Banano: Aplicados a las zonas bananeras de Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 592 p.
- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *J. Irrig. Drain. Eng.* 126 (4): 265-267.
- Stöckle, C. O., J. Kjelgaard, and G. Bellocchi. 2004. Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrig. Sci.* 23 (1): 39-46.
- Tabari, H., M. E. Grismer, and S. Trajkovic. 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions *Irrigation Sci.* 31 (2): 107-117.
- Tabari, H., O. Kisi, A. Ezani, and P. Hosseinzadeh Talaei. 2012. Svm, anfis, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment *J. Hydrol.* 444-445: 78-89.
- Teegavarapu, R. S., and V. Chandramouli. 2005. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *J. Hydrol.* 312 (1): 191-206.
- Yoder, R. E., L. O. Odhiambo, and W. C. Wright. 2005. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States. *Appl. Eng. Agric.* 21 (2): 197-202.