

Valoración de la evapotranspiración real estimada y rendimiento de caña de azúcar en Veracruz, México*

Assessment of estimated real evapotranspiration and yield of sugarcane in Veracruz, Mexico

Juan Manuel Hernández-Pérez¹, Cesáreo Landeros-Sánchez^{1§}, Juan Pablo Martínez-Dávila¹, Gustavo López-Romero¹, Diego Esteban Platas-Rosado¹ e Iouri Nikolskii-Gavrilov²

¹Colegio de Postgraduados-Campus Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz km 88.5. Vía Paso de Ovejas, entre Puente Jula y Paso San Juan, Tepetates, Veracruz, México. CP. 91690. Tel. 01 (229) 2010770, ext. 64301. (juan.hernandez@colpos.mx; jpmartin@colpos.mx; gustavolr@colpos.mx; dplatas@colpos.mx)². Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera Federal México-Texcoco, km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (nikolski@colpos.mx). [§]Autor para correspondencia: clander@colpos.mx.

Resumen

La caña de azúcar es uno de los principales cultivos en las zonas tropicales y subtropicales, que presentan poca variación climática. Sin embargo, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) afirmó que la agricultura en zonas tropicales tendrán grandes cambios en los próximos 100 años por efecto de este fenómeno. En el estado de Veracruz, México, la precipitación media anual es alrededor de 1 500 mm y una temperatura promedio anual de 23 °C. No obstante, en los últimos 30 años se han registrado alteraciones en el ciclo hidrológico en las áreas cañeras de la zona centro del estado de Veracruz (Distrito de Riego 035 La Antigua), como resultado del fenómeno del cambio climático, impactando significativamente los patrones de precipitación (Pp), evaporación (Ev) y temperatura (T) de la zona. El objetivo del presente estudio fue valorar la evapotranspiración real estimada (ETR) de la caña de azúcar, como resultado del incremento en la tasa de evaporación y temperatura, y cambios en los patrones de precipitación registrados en un periodo de 30 años (1980-2010); así como, la correspondencia entre la ETR con los rendimientos de caña de azúcar observados en dicho periodo en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, como consecuencia

Abstract

Sugar cane is one of the main crops in tropical and subtropical areas, which have little climatic variation. However, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) said that agriculture in tropical areas will undergo major changes in the next 100 years as a result of this phenomenon. In the state of Veracruz, Mexico, the average annual rainfall is about 1 500 mm and an annual average temperature of 23 °C. However, in the last 30 years, there have been alterations in the hydrological cycle in the sugarcane areas of the central area of the state of Veracruz (Irrigation District 035 La Antigua), as a result of the phenomenon of climate change, significantly impacting the patterns of Precipitation (Pp), evaporation (Ev) and temperature (T) of the zone. The objective of this paper was to evaluate the estimated real evapotranspiration (ETR) of sugar cane, as a result of the increase in the evaporation rate and temperature, and changes in the precipitation patterns recorded in a period of 30 years (1980-2010); as well as the correspondence between the ETR and sugarcane yields observed during the period in the sugar mill area of La Gloria and El Modelo as a consequence of climate change. The ETR was calculated using the semi-empirical

* Recibido: marzo de 2017
Aceptado: junio de 2017

del cambio climático. La ETR se calculó mediante el uso de los métodos semiempíricos Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani y el Tanque Evaporímetro Tipo A. Se encontró que existe una alta correlación entre los métodos Penman-Monteith FAO y Hargreaves-Samani ($r^2= 0.9307$). No se encontró relación alguna entre la ETR y el rendimiento en campo registrado en la zona de abasto de los ingenios referidos. Finalmente, se observa que existe una alta correlación entre la ETR y la temperatura máxima derivada de los métodos de Penman-Monteith FAO ($r^2= 0.9445$) y Hargreaves-Samani ($r^2= 0.7773$).

Palabras clave: Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, impacto del cambio climático, Penman-Monteith FAO, tanque evaporímetro tipo A.

Introducción

Conforme a lo reportado por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2001), el impacto del cambio climático sobre la agricultura varía de acuerdo al cultivo y al sistema de producción de éste, dando como resultado la pérdida de las cosechas y la disminución en la productividad agrícola. México es el segundo país más vulnerable a este fenómeno, después de la India y bajo esta perspectiva, la producción agrícola nacional podría caer en más de un 25% hacia el año 2080 (Moyer, 2010). Desde el punto de vista socioeconómico, el cultivo de la caña de azúcar, en conjunto con la agroindustria cañera, es de suma importancia para la economía mexicana. El agroecosistema con caña de azúcar genera empleos directos del orden de 450 mil y de manera indirecta, para 2.2 millones de personas (Moreno-Seceña *et al.*, 2011).

La evapotranspiración se considera como uno de los parámetros importantes durante en el desarrollo de los cultivos y el conocimiento de ésta, permite establecer una buena planeación de los recursos hídricos, así como hacer un uso eficiente del agua de riego a nivel parcelario (Rodríguez *et al.*, 2015). Actualmente se utilizan métodos semiempíricos, los cuales son ampliamente utilizados en casos prácticos de manejo del riego, en especial la ecuación desarrollada por Penman-Monteith, la cual goza de aceptación por la comunidad científica mundial, y que fue propuesta por la FAO como método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración, con base en la información climática.

methods Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani and the Evaporimeter Tank Type A. A high correlation was found between the Penman-Monteith FAO and Hargreaves-Samani methods ($r^2= 0.9307$). No relationship was found between the ETR and the field yield recorded in the supply area of the referred mills. Finally, it is observed a high correlation between the ETR and the maximum temperature derived from the Penman-Monteith FAO ($r^2= 0.9445$) and Hargreaves-Samani ($r^2= 0.7773$) methods.

Keywords: Blaney-Criddle, evaporimeter tank type A, Hargreaves-Samani, impact of climate change, Penman-Monteith FAO.

Introduction

As reported by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001), the impact of climate change on agriculture varies according to the crop and crop production system, resulting in crop loss and decrease in agricultural productivity. Mexico is the second most vulnerable country to this phenomenon, after India and from this perspective, national agricultural production could fall by more than 25% by 2080 (Moyer, 2010). From the socioeconomic point of view, the cultivation of sugar cane, together with sugarcane agroindustry, is of paramount importance for the Mexican economy. The agroecosystem with sugar cane generates direct jobs of the order of 450 thousand and indirectly, for 2.2 million people (Moreno-Seceña *et al.*, 2011).

Evapotranspiration is considered to be one of the important parameters during crop development and its understanding, allows establishing good water resources planning, as well as making efficient use of irrigation water at the parcel level (Rodríguez *et al.*, 2015). Semiempirical methods are currently used, which are widely used in practical cases of irrigation management, especially the equation developed by Penman-Monteith, which is accepted by the world scientific community, and proposed by the FAO as a standardized method for the calculation of evapotranspiration, based on the climatic information.

For the particular case of this research it was considered the study of the amount of water that corresponds effectively to evapotranspiration. Therefore, the concept

Para el caso particular de esta investigación se consideró el estudio de la cantidad de agua que corresponde efectivamente a la evapotranspiración. Por lo tanto, se utilizó el concepto de evapotranspiración actual o efectiva, la cual se conoce, más comúnmente, como evapotranspiración real (Mendoza, 2013). El objetivo del presente estudio fue valorar la evapotranspiración real estimada (ETR) de la caña de azúcar, como resultado de incremento en la tasa de evaporación y temperatura, y cambios en los patrones de precipitación registrados en un periodo de 30 años (1980-2010); así como la correspondencia entre la ETR con los rendimientos de caña de azúcar observados en dicho periodo en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, como consecuencia del cambio climático.

Materiales y métodos

La presente investigación se realizó en la zona de abasto de caña de azúcar de los ingenios La Gloria y El Modelo, ubicados en el Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz, México. Esta zona se localiza en la región central de Veracruz y abarca los municipios de Úrsulo Galván, La Antigua, Puente Nacional, Paso de Ovejas y Actopan (Figura 1).

Dada la importancia de esta actividad agrícola en el contexto social de la región, se estableció un modelo conceptual en el cual se describe la interacción del agroecosistema (AES) con caña de azúcar y la sociedad veracruzana en la zona centro del Golfo de México (Figura 2).

A fin de alcanzar el objetivo propuesto, se establecieron cuatro fases de investigación, que se describen a continuación. La primera consistió en la integración de una base de datos con información de temperatura (T), evaporación (Ev), precipitación (Pp) y el rendimiento de la caña de azúcar registrado durante el periodo 1980-2010. La información climática se registró en las estaciones climáticas ubicadas dentro de la zona de estudio, como son: Los Ídolos (30068), Actopan (30003), La Mancha (30353), Santa Rosa (30158), El Diamante (30266), Tamarindo (30165), Puente Nacional (CFE) (30137), Rinconada (30141), Loma Fina (30093), Puente Jula (30136) y José Cardel (30193).

En la segunda, se definieron los métodos para estimar la evapotranspiración de referencia, la cual se utilizó en el cálculo de la evapotranspiración real estimada (ETR) de la caña de azúcar (Cuadro 1).

of actual or effective evapotranspiration was used, which is more commonly known as actual evapotranspiration (Mendoza, 2013). The objective of this paper was to evaluate the estimated real evapotranspiration (ETR) of sugarcane, as a result of an increase in the evaporation and temperature rate, and changes in precipitation patterns recorded over a period of 30 years (1980-2010); as well as the correspondence between the ETR and the sugar cane yields observed during the period in the sugar mill area of La Gloria and El Modelo as a consequence of climate change.

Materials and methods

This research was carried out in the area of sugar cane supply of the mills La Gloria and El Modelo, located in the Irrigation District 035 La Antigua, Veracruz, Mexico. This supply zone is located in the central region of the state of Veracruz and includes the municipalities of Úrsulo Galván, La Antigua, Puente Nacional, Paso de Ovejas and Actopan (Figure 1).



Figura 1. Localización del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz.

Figure 1. Location of the Irrigation District 035 La Antigua, Veracruz.

Given the importance of this agricultural activity in the social context of the region, a conceptual model was established in which the interaction of the agroecosystem (AES) with sugar cane and the Veracruz society in the central area of the Gulf of Mexico (Figure 2).

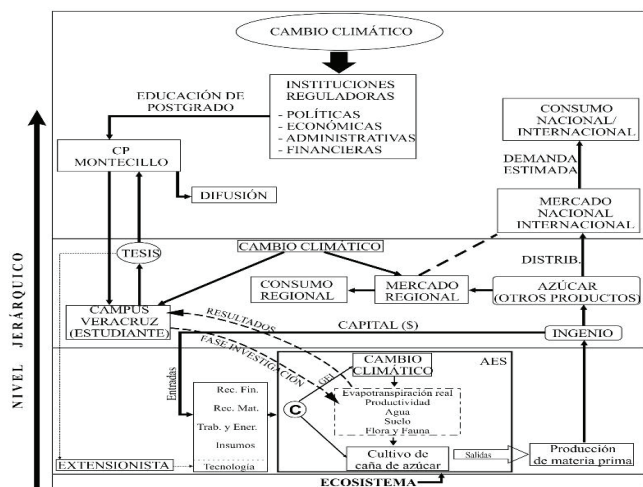


Figura 2. Modelo conceptual del agroecosistema con caña de azúcar.
Figure 2. Conceptual model of agroecosystem with sugar cane.

In order to achieve the proposed objective, four research phases, which are described below, were established. The first consisted in the integration of a database with information on temperature (T), evaporation (Ev), precipitation (Pp) and sugarcane yield during the 1980-2010 period. The climatic information was recorded in the climatic stations located within the study area, such as: Los Ídolos (30068), Actopan (30003), La Mancha (30353), Santa Rosa (30158), El Diamante (30266), Tamarindo (30165), Puente Nacional (CFE) (30137), Rinconada (30141), Loma Fina (30093), Puente Jula (30136), and José Cardel (30193).

In the second one, the methods for estimating the reference evapotranspiration, which was used in the estimation of estimated real evapotranspiration (ETR) of sugarcane (Table 1), were defined.

Cuadro 1. Métodos seleccionados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.
Table 1. Selected methods for calculation of reference evapotranspiration.

Método	Fórmula
Penman-Monteith FAO	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$
Blaney-Criddle	$ET_0 = Pp(0.46T + 8.13)$
Hargreaves-Samani	$ET_0 = 0.0023(T_{med} + 17.78)R_0(T_{máx} - T_{mín})^{0.5}$
Tanque evaporímetro tipo A	$ET_0 = K_p E_{pan}$

La tercera fase involucró el cálculo de la ETR, con base en las variables climáticas incluidas en los métodos seleccionados. Finalmente, en la última fase se compararon los resultados obtenidos de ETR mediante los métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani y tanque evaporímetro tipo A, con los calculados con el método Penman-Monteith FAO. Este último se estableció como de referencia por ser el método más completo y recomendado a nivel mundial, pues considera la mayoría de las variables climáticas, lo que incrementa la probabilidad de obtener resultados más precisos (Medeiros, 1998). Para lo anterior, se utilizó el software estadístico STATISTICA v7.0. Además, se hizo una correlación entre los rendimientos de caña de azúcar registrados durante el periodo de 1980-2010 por los ingenios La Gloria y El Modelo, y la ETR calculada por los cuatro métodos.

The third phase involved the calculation of the ETR, based on the climatic variables included in the selected methods. Finally, in the last phase the obtained results of ETR were compared by the methods of Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani and evaporimeter tank type A, with those calculated using the Penman-Monteith FAO method. The latter was established as a reference because it is the most complete and recommended method worldwide, considering most of the climatic variables, which increases the probability of obtaining more precise results (Medeiros, 1998). Statistical software STATISTICA v7.0 was used for the above. In addition, a correlation was made between sugarcane yields recorded during the period 1980-2010 by the mills La Gloria and El Modelo, and the ETR calculated by the four methods.

Resultados y discusión

Con base en los datos registrados en las estaciones climáticas, durante 1980-2010, se calculó la ETR mediante el uso de los métodos antes referidos. Posteriormente, se relacionó con el rendimiento de caña de azúcar, reportado por los ingenios La Gloria y El Modelo, en el mismo periodo (Figura 3).

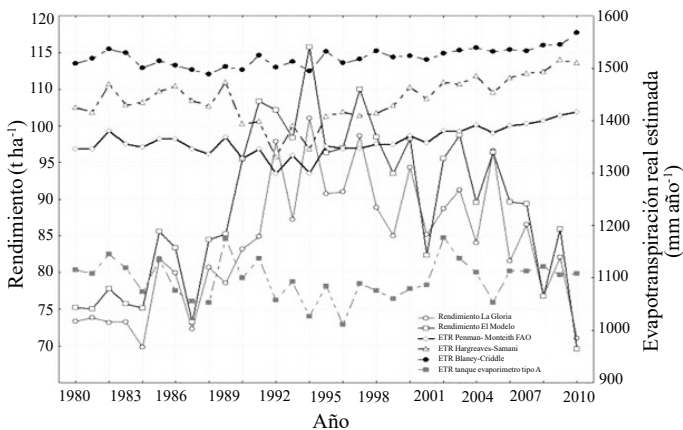


Figura 3. Relación de los valores de la ETR y el rendimiento del cultivo de caña de azúcar en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, Veracruz, México.
Figure 3. Relationship of ETR values and sugarcane cultivation yield in the supply area of La Gloria and El Modelo mills, Veracruz, Mexico.

El análisis de los resultados mostrados en la Figura 3, se encontró que la ETR registró un comportamiento casi constante durante 1980-2010; asimismo, se observó un comportamiento muy errático en el rendimiento en campo para este mismo periodo. En adición a lo anterior, Cassalet *et al.* (1995) reportaron que el consumo total de agua de la caña de azúcar en diferentes países presentan rangos de variación muy amplios. Por lo general, este consumo anual por cultivo oscila entre 1 200 y 1 500 mm, y es mayor en las zonas subtropicales que se caracterizan por presentar épocas secas más prolongadas y por una evaporación mayor que en las zonas tropicales.

Asimismo, se compararon los métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani y el tanque evaporímetro tipo A contra el método de Penman-Monteith FAO, a fin de determinar si la ETR calculada por los tres primeros métodos presentaba un comportamiento similar a la ETR calculada por este último. Los tres primeros métodos utilizaron menos variables climáticas para su cálculo que Penman-Monteith (Figura 4).

Results and discussion

Based on the data recorded in the climatic stations during the period 1980-2010, the ETR was calculated by using each of the above methods. Later, this was related to the yield of the sugar cane crop, reported by La Gloria and El Modelo mills, in the same period (Figure 3).

From the analysis of the results shown in Figure 3, it was found that the ETR showed an almost constant behavior during the period of 1980-2010; also, a very erratic behavior in the field yield was observed for this same period. In addition to the above, Cassalet *et al.* (1995) reported that the total water consumption of sugarcane in different countries has very wide variation ranges. Generally, this annual crop consumption ranges from 1 200 to 1 500 mm and is higher in subtropical areas characterized by longer dry seasons and greater evaporation than in tropical areas.

Likewise, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani and A-type evaporimeter methods were compared against the Penman-Monteith FAO method, in order to determine if the ETR calculated by the first three methods had a behavior similar to the calculated ETR by the latter. The first three methods used fewer climate variables for its calculation than Penman-Monteith (Figure 4).

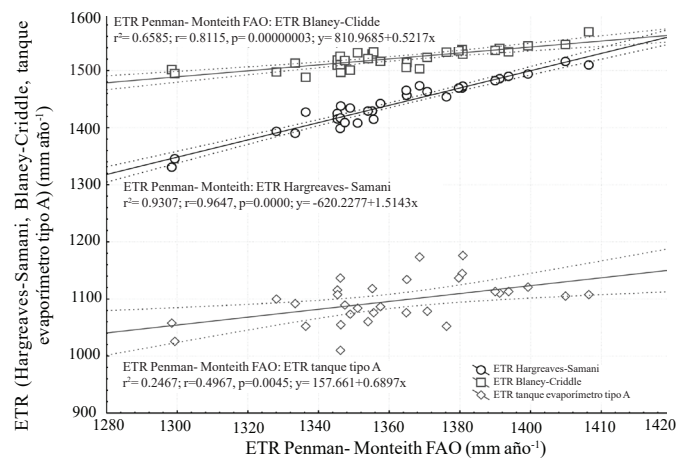


Figura 4. Comparación de la ETR calculada por los métodos de Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani y tanque evaporímetro tipo A, y la calculada por el método Penman-Monteith FAO.

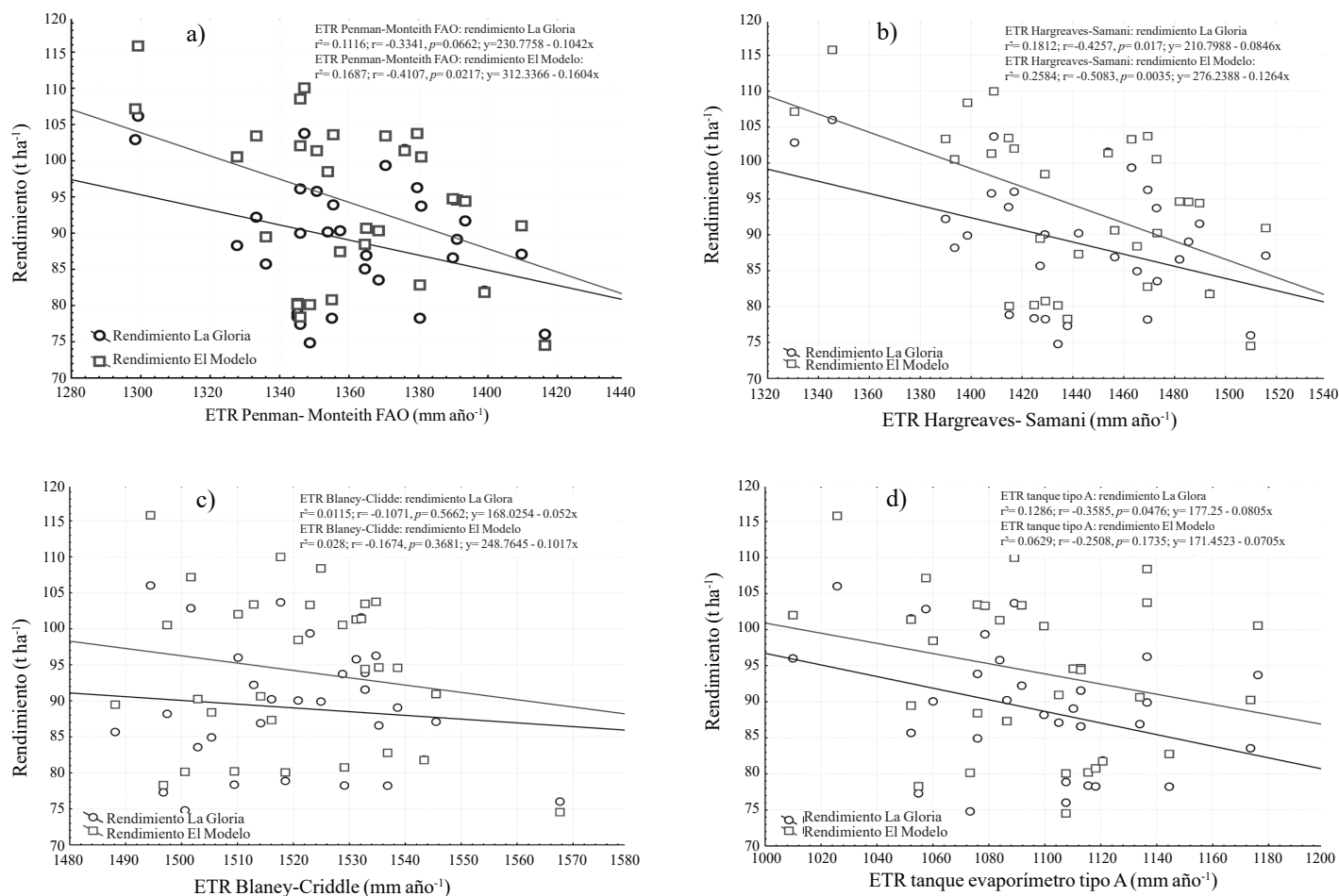
Figure 4. Comparison of the ETR calculated by the Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani and evaporimeter tank type A methods, and the calculated by the Penman-Monteith FAO method.

Se encontró que el método Hargreaves-Samani tuvo mejor ajuste al método de Penman-Monteith FAO (método de referencia) con un coeficiente de determinación $r^2= 0.9307$. Sin embargo, al comparar los datos de ETR calculados con los métodos de Blaney-Criddle ($r^2=0.6585$) y tanque evaporímetro tipo A ($r^2=0.4967$) con el método de Penman-Monteith FAO, el primero arrojó valores superiores a los calculados por Penman-Monteith FAO. En el caso del tanque tipo A, los valores de ETR fueron inferiores a los calculados por el método de referencia.

La Figura 5 muestra las correlaciones entre el rendimiento en campo registrado en los ingenios antes mencionados y los valores de ETR calculados con los métodos Penman-Monteith FAO (a), Hargreaves-Samani (b), Blaney-Criddle (c) y tanque evaporímetro tipo A (d), demostrándose que existe una baja correlación entre el rendimiento y la ETR calculada por los métodos antes referidos.

It was found that the Hargreaves-Samani method had a better fit to the FAO Penman-Monteith method (reference method) with a determination coefficient of $r^2= 0.9307$. However, when comparing the calculated ETR data with the Blaney-Criddle methods ($r^2= 0.6585$) and the A-type evaporimeter tank ($r^2= 0.4967$) with the Penman-Monteith FAO method, the first method yielded higher values than those calculated by Penman-Monteith FAO. In the case of tank type A, the ETR values calculated with this method were lower than those calculated by the reference method.

Figure 5 shows the correlations between the field yield reported in the above mentioned mills and the ETR values calculated with the Penman-Monteith methods FAO (a), Hargreaves-Samani (b), Blaney-Criddle (c) and evaporimeter tank type A (d), demonstrating that there is a low correlation between the yield and the ETR calculated by the above methods.



**Figura 5. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR calculada con los métodos Penman-Monteith FAO (a), Hargreaves-Samani (b), Blaney-Criddle (c) y tanque evaporímetro tipo A (d).
 Figure 5. Correlation between sugar cane field yield recorded in La Gloria and El Modelo mills and the ETR calculated with the Penman-Monteith FAO (a), Hargreaves-Samani (b), Blaney-Criddle (c) and evaporimeter tank type A (d) methods.**

Del análisis anterior se infiere que el cultivo de caña de azúcar no contó con la disponibilidad de agua requerida para cubrir su demanda evapotranspirativa. Por lo tanto, se demostró que el bajo rendimiento en campo, esto es, valores inferiores a las 100 t ha⁻¹, registrados durante el periodo de 1980-2010, es consecuencia del mal manejo agrícola por parte de los productores cañeros. Esto puede ser, además, resultado de la falta de organización en los planes de aplicación de riego durante los periodos de sequía, la baja disponibilidad de agua en las zonas de riego cañeras, distribución irregular de la precipitación, y presencia en los últimos años de periodos de precipitación más cortos, con lluvias más intensas. Esto último, se muestra claramente como uno de los impactos negativos del cambio climático.

Conclusiones

El cambio climático juega un papel importante en la producción agrícola, primordialmente en la zona tropical, ya que se estiman incrementos en la temperatura y disminución en las precipitaciones, lo que se traduciría en pérdidas y bajos rendimientos en los cultivos. Por lo tanto, y con base en los resultados observados en esta investigación, la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo en Veracruz, México, puede llegar a sufrir serias afectaciones que resulten en rendimientos de caña de azúcar por unidad de superficie no rentables, si no se aplican medidas de adaptación de este cultivo ante el fenómeno del cambio climático.

Literatura citada

- Cassalett, D. C.; Torres, A.; Isaacs, E. C. H. 1995. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali, Colombia, CENICANA. 491 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001: synthesis Report, Watson, R. T. and the Core Writing Team (Eds.), Geneva, Switzerland. 184 p. <http://www.pnuma.org/.../apellpublicaciones.php>.
- Medeiros, S. L. P. 1998. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria. R. S. Rev. Bras. Agrometeorol. (BR). 1(6):105-109.

From the previous analysis it is inferred that the sugar cane crop did not have the water availability required to cover its evapotranspirative demand. Therefore, it was demonstrated that the low field yield, that is, values lower than 100 t ha⁻¹, recorded during the 1980-2010 period, is a consequence of the bad agricultural management by cane producers. This can also be a result of the lack of organization in the irrigation application plans during drought periods, the low water availability in the sugar cane irrigation areas, irregular precipitation distribution, and the presence in recent years of shorter precipitation periods, with more intense rains. The latter is clearly shown as one of the negative impacts of climate change.

Conclusions

Climate change plays an important role in agricultural production, primarily in the tropical zone, as increases in temperature and decreases in rainfall are estimated, resulting in losses and low yields in crops. Therefore, and based on the results observed in this research, the supply area of the Gloria and El Modelo mills in Veracruz, Mexico, may suffer serious effects that would result in non profitable yields of sugar cane per unit area, if adaptation measures of this crop to the climate change phenomenon are not applied.

End of the English version



- Mendoza M, A. E. 2013. Riego por goteo. (Ed.). Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal "Enrique Álvarez Córdova". El Salvador. 91p.
- Moreno-Seceña J.; Landeros-Sánchez, C.; Pérez, V.A.; López-Collado J.; Palacios V, O. y Castañeda-Chávez, M. R. 2011. Fertilización nitrogenada en caña de azúcar en el módulo I-1 La Antigua Veracruz, México. Trop. Subtrop. Agroecosy. 13(3):373-379.
- Moyer, M. 2010. How much is left? A graphical accounting of the limits to what one planet can provide. Sci. Am. 303(3):74-81.
- Rodríguez, J. C.; López A, J. E.; Velázquez A, T. d J.; Díaz V, T.; Watts T, C.; Castellanos V, A. E. y Partida, R. L. 2015. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile Bell en el Valle de Culiacán, México. Terra Latinoam. 33(3):209-219.