

Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar*

Application of remote sensing technologies for estimating sugarcane yield

Guillermo Alberto Zenteno Cruz^{1§}, Enrique Palacios Vélez¹, Leonardo Tijerina Chávez¹ y Héctor Flores Magdaleno¹

¹Posgrado en Hidrociencias-Colegio de Postgraduados. *Campus* Montecillo, Texcoco. Estado de México, México. CP. 56230. Tel. 01 (595) 9520200, ext. 1172. (epalacio@colpos.mx; tijerina@colpos.mx; mhector@colpos.mx). [§]Autor para correspondencia: zenteno.guillermo@colpos.mx.

Resumen

Los productores de caña de azúcar buscan en forma constante reducir costos, aumentar la productividad y el rendimiento. Por otra parte, toma gran importancia la predicción del rendimiento de los cultivos para una mejor planificación de políticas agrícolas y de seguridad alimentaria en una economía de mercado globalizado. La presente investigación se llevó a cabo en la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata, en el estado de Morelos, en una superficie de 10 664 ha, durante el ciclo agrícola 2009-2010. El objetivo del estudio fue calibrar una metodología para estimar el rendimiento de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con base en el análisis temporal de índices de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) e índices de estrés de humedad (MSI) obtenidos de imágenes Landsat-7 ETM+ y la evapotranspiración del cultivo (ETc) estimada calculando la variable Kc en función de índices NDVI y utilizando la evapotranspiración de referencia (ETo) obtenida de estaciones meteorológicas. Como resultado del estudio se obtuvieron relaciones entre los valores promedio de los índices y la ETc, con el rendimiento medido en campo en 23 parcelas de control; observándose una R² de 0.92, 0.77 y 0.85, respectivamente. A partir del modelo de mejor ajuste, se estimó el rendimiento promedio para la zona de

Abstract

The sugarcane producers are constantly looking to reduce costs, increase productivity and yield. On the other hand, the prediction of the yield of the crops for a better planning of agricultural policies and food security in a globalized market economy is very important. The present investigation was carried out in the area of supply of Sugarmill Emiliano Zapata, in the state of Morelos, in an area of 10 664 ha, during the agricultural cycle 2009-2010. The objective of the study was to calibrate a methodology to estimate the yield of sugarcane (*Saccharum officinarum*) based on the temporal analysis of vegetation indices of normalized differences (NDVI) and moisture stress indexes (MSI) obtained from Landsat-7 ETM+ and crop evapotranspiration (ETc) estimated by calculating the variable Kc as a function of NDVI indexes and using reference evapotranspiration (ETo) obtained from meteorological stations. As a result of the study, relationships between the average values of the indices and the ETc were obtained, with the yield measured in the field in 23 control plots; with an R² being 0.92, 0.77 and 0.85, respectively. From the best fit model, we estimated the average yield for the study area of 114.3 t ha⁻¹. The Secretariat of Agriculture Fisheries and Food; through

* Recibido: julio de 2017
Aceptado: septiembre de 2017

estudio de 114.3 t ha⁻¹. La Secretaría de Agricultura Pesca y Alimentación; a través, del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), reportó un rendimiento promedio en Morelos para el año 2009 de 115.4 t ha⁻¹. Lo que permite conocer la efectividad de las estimaciones realizadas.

Palabras claves: estrés hídrico, evapotranspiración, índices de vegetación, Landsat-7 ETM+.

Introducción

La caña de azúcar, *Saccharum officinarum*, es una planta perenne en forma de tallo que es cultivada en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (actualmente se cultiva en 105 países) entre las latitudes 37° N y 31° S, principalmente, por su capacidad para almacenar grandes cantidades de sacarosa (10-18%) en los internodos, dependiendo de la variedad y de las condiciones agroclimáticas como factores limitantes para su crecimiento, además de la etapa de desarrollo (planta, soca o resoca), suelo, fertilización, clima, temperatura, plagas, malezas, enfermedades y la disponibilidad de agua, tienen relación directa en la productividad del cultivo (Inman *et al.*, 2005; Abdel *et al.*, 2008).

En la actualidad, la evaluación del nivel productivo de la caña de azúcar se realiza al finalizar cada zafra y mediante estimaciones de rendimiento con anterioridad a la cosecha, basándose en la experiencia de técnicos -a través de observaciones de campo y muestreos utilizando datos estadísticos de años anteriores- sin considerar la distribución espacial del área plantada y su variabilidad a diversos factores ambientales, lo que trae como consecuencia errores en los estimados de producción, principalmente en zonas agrícolas de gran heterogeneidad (Aguilar *et al.*, 2010).

El primer paso para la estimación, la optimización de la producción, el transporte y el uso de los recursos de la biomasa cañera es conocer el potencial de las tierras agrícolas para producir caña de azúcar. Sin embargo, las mediciones sobre el terreno no se realizan con el detalle suficiente para la distribución espacial, prefiriéndose realizar estimados de producción mediante análisis estadístico (Krishna, 2002; Fortes, 2006).

Los recientes avances en agricultura de precisión (AP) y en cartografía de la cubierta terrestre pueden hacer posible el monitoreo y la estimación del estado del cultivo de caña de

the Agro-Food and Fisheries Information Service (SIAP), reported an average yield in Morelos for the year 2009 of 115.4 t ha⁻¹. This allows to know the effectiveness of the estimates made.

Keywords: evapotranspiration, Landsat-7 ETM+, vegetation index, water stress.

Introduction

The sugarcane, *Saccharum officinarum*, is a perennial stem-shaped plant that is cultivated in the tropical and subtropical regions of the world (currently cultivated in 105 countries) between latitudes 37° N and 31° S, mainly because of its capacity to store large quantities of sucrose (10-18%) in the internodes, depending on the variety and the agroclimatic conditions as limiting factors for their growth, besides the stage of development (plant, soca or resoca), soil, fertilization, and other factors such as climate, temperature, pests, weeds, diseases and water availability, are directly related to crop productivity (Inman *et al.*, 2005; Abdel *et al.*, 2008).

Currently, the evaluation of the production level of sugar cane is done after each harvest and by performance estimates prior to harvesting, based on experience of technical -through field observations and data using statistical sampling previous years- without considering the spatial distribution of the planted area and its variability to various environmental factors, which results in errors in the production estimates, mainly in agricultural areas of great heterogeneity (Aguilar *et al.*, 2010).

The first step in estimating, optimizing the production, transport and use of biomass resources is to know the potential of agricultural land to produce sugar cane. However, measurements on the ground are not made with enough detail for the spatial distribution, being preferred to make estimates of production by statistical analysis (Krishna, 2002; Fortes, 2006).

Recent advances in precision agriculture (AP, for its acronym in Spanish) and land cover mapping may make it possible to monitor and estimate the status of sugarcane cultivation in a region determined at the farm or production unit level, due to the low acquisition cost of images, their spatial coverage and the possibility of generating indices of their spectral bands (Zhang and Anderson, 2005).

azúcar en una región determinada a escala predio o unidad productiva, debido al bajo costo de adquisición de las imágenes, su cobertura espacial y la posibilidad de generar los índices de sus bandas espectrales (Zhang y Anderson, 2005).

En este sentido, los sistemas de información geográfica (SIG) y la percepción remota (PR) brindan la posibilidad de vincular espacialmente distintas fuentes de información, y a partir del análisis de las imágenes generadas por sensores remotos, es posible obtener información de las características de las coberturas vegetales, utilizando diferentes técnicas de procesamiento de imágenes; entre ellas, el cálculo de índices de vegetación a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda, mismos que posibilitan la estimación el comportamiento de varios parámetros biofísicos de los cultivos (Hatfield, 2008).

Por lo tanto, la PR presenta una visión sinóptica de las zonas agrícolas y posibilita un seguimiento temporal del desarrollo fenológico de los cultivos, especialmente en los procesos relacionados con la identificación y monitoreo de grandes áreas agrícolas, estimación de la producción, detección de enfermedades y estrés, a través del análisis de la distribución espacial, el mapeo de las diversas zonas productivas, direccionamiento del muestreo y observación en campo, promoviendo una mayor evaluación del potencial productivo de las áreas sembradas (Rudorff y Batista, 1990; Soria, 2004; Ueno *et al.*, 2005).

Existen diversas metodologías para estimar el estrés hídrico, la uniformidad del riego y el rendimiento de los cultivos, mediante el uso de imágenes de satélite, como son el índice de estrés de humedad (MSI) por sus siglas en inglés, Rock *et al.* (1986), y el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) por sus siglas en inglés, Rouse *et al.* (1974).

El objetivo del presente estudio fue calibrar una metodología para medir variables fisiológicas del cultivo de caña de azúcar; tales como el índice NDVI, MSI y ETc, para estimar el rendimiento usando técnicas de análisis de información en imágenes Landsat 7 ETM+ en el cultivo de caña de azúcar.

Materiales y métodos

El estudio se efectuó en la zona de abastecimiento del ingenio Emiliano Zapata, en el estado de Morelos. El motivo radica en el hecho de que dicho estado se ubica dentro de

In this sense, geographic information systems (SIG, for its acronym in Spanish) and remote sensing (PR, for its acronym in Spanish) provide the possibility of spatially linking different sources of information, and from the analysis of the images generated by remote sensors, it is possible to obtain information about the characteristics of the vegetal coverings, using different techniques of image processing; including the calculation of vegetation indices based on reflectivity values at different wavelengths, which allow the estimation of the behavior of several biophysical parameters of the crops (Hatfield, 2008).

Therefore, the PR presents a synoptic view of the agricultural zones and allows a temporal monitoring of the phenological development of the crops, especially in the processes related to the identification and monitoring of large agricultural areas, estimation of production, detection of diseases and stress, through the analysis of the spatial distribution, the mapping of the diverse productive zones, sampling direction and observation in the field, promoting a greater evaluation of the productive potential of the planted areas (Rudorff and Batista, 1990; Soria, 2004; Ueno *et al.*, 2005).

There are several methodologies for estimating water stress, irrigation uniformity and crop yields, using satellite images, such as the Moisture Stress Index (MSI), Rock *et al.* (1986), and the normalized difference vegetation index (NDVI), Rouse *et al.* (1974).

The objective of the present study was to calibrate a methodology to measure physiological variables of the cultivation of sugar cane; such as the NDVI, MSI and ETc index, to estimate yield using Landsat 7 ETM+ image information analysis techniques in sugarcane cultivation.

Materials and methods

The study was carried out in the supply area of the sugarmill Emiliano Zapata, in the state of Morelos. The reason lies in the fact that this state is located within the first places as producer of sugar cane, under irrigation and temporary conditions. According to SIG data from the mill, a total of 10 664 ha was established during the 2009-2010 agricultural cycle; however, its area of influence covers around 19 735 ha, distributed mainly in the municipalities of Tlaltizapan, Jojutla, Ayala, Tlaquiltenango, Puente of Ixtla, Xochitepec

los primeros lugares como productor de caña de azúcar, bajo condiciones de riego y temporal. De acuerdo con datos de SIG del ingenio, se establecieron un total de 10 664 ha durante el ciclo agrícola 2009-2010; sin embargo, su área de influencia abarca alrededor de 19 735 ha, distribuidas principalmente en los municipios de Tlaltizapan, Jojutla, Ayala, Tlaquiltenango, Puente de Ixtla, Xochitepec y Zacatepec. Esta zona se localiza a una altura promedio de 1 480 msnm y sus coordenadas geográficas extremas son: 18° 20' a 19° 08' de latitud norte y 98° 38' a 99° 30' de longitud oeste.

Los tipos de suelos que predominan son los siguientes: Vertisoles, Castañozem y Litosoles. El clima es del tipo BS1(h')w semiseco cálido, con lluvias en verano e invierno poco definido, con la mayor sequía al final del otoño, invierno y principios de primavera, García (1988). La precipitación y temperatura media anual es de 900 mm y 24 °C, respectivamente (Figura 1).

Los materiales que se utilizaron fueron: un equipo GPS (global positioning system), computadores de escritorio y cámara fotográfica. Se utilizaron 30 imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ de fecha 21 de octubre de 2008 a 21 de junio de 2010, las cuales fueron obtenidas de la página web: global visualización de USGS Visor de <http://glovis.usgs.gov/>. Las imágenes constan de ocho bandas con una resolución espacial de 30 m para las seis bandas reflectivas (1 a 5 y 7), 15 m para la banda pancromática (8) y 60 m para la banda térmica (6); las cuales fueron corregidas geográficamente empleando el sistema de coordenadas WGS84 y la proyección transversal de mercator (UTM zona 14 Norte). El software utilizado para el procesamiento de las imágenes fue IDRISI® de Clark Labs (2006) y ERDAS® de Leica Geosystems (2008), así como el software para la corrección atmosférica desarrollado por Palacios (2007) y para el cálculo de valores promedio de índices de vegetación en parcelas denominado EStadParcelas.exe. Para el ensayo se eligieron 23 parcelas de control con cultivo de caña de azúcar, las cuales se localizan en la zona de abasto del Ingenio (Figura 2).

Además, se contó con información agrometeorológica diaria (mismo periodo en que se adquirieron las imágenes de satélite) de la estación INIFAP disponible en la Web en la dirección: (www.clima.inifap.gob.mx), la cual forma parte de la red de estaciones agroclimáticas de Morelos y se localiza a una altura de 910 msnm en las coordenadas 18° 39' de latitud norte y 99° 12' de longitud oeste, en el Campo Experimental del INIFAP, en Zacatepec de Hidalgo, Morelos.

and Zacatepec. This zone is located at an average height of 1 480 msnm and its extreme geographical coordinates are: 18° 20' to 19° 08' north latitude and 98° 38' to 99° 30' west longitude.

The predominant types of soils are: Vertisols, Castañozem and Litosols. The climate is of the type BS1(h')w warm semi-dry, with rains in summer and winter not defined, with the greatest drought at the end of autumn, winter and early spring, García (1988). The mean annual precipitation and temperature is 900 mm and 24 °C, respectively (Figure 1).

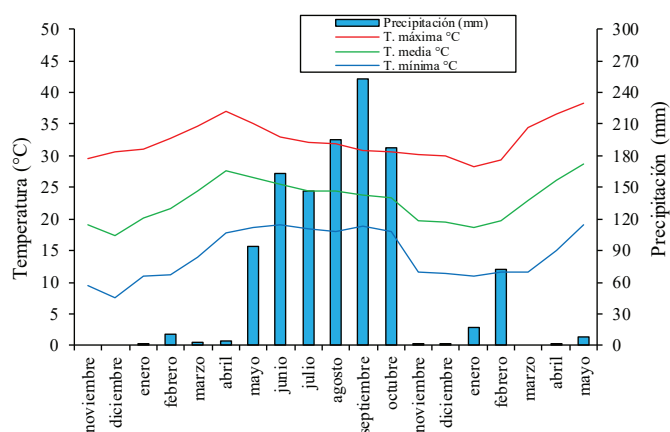


Figura 1. Distribución mensual de la temperatura y precipitación en la estación INIFAP, Zacatepec de Hidalgo, Morelos.

Figure 1. Monthly distribution of temperature and precipitation at the INIFAP station, Zacatepec de Hidalgo, Morelos.

The materials used were: a GPS (global positioning system), desktop computers and camera. We used 30 images of Landsat 7 ETM+ satellite from October 21, 2008 to June 21, 2010, which were obtained from the website: Global View of USGS Viewer of <http://glovis.usgs.gov/>. The images consist of eight bands with a spatial resolution of 30 m for the six reflective bands (1 to 5 and 7), 15 m for the panchromatic band (8) and 60 m for the thermal band (6); which were corrected geographically using the WGS84 coordinate system and the mercury transverse projection (UTM zone 14 North). The software used for image processing was IDRISI® by Clark Labs (2006) and ERDAS® by Leica Geosystems (2008), as well as the software for atmospheric correction developed by Palacios (2007) and for the calculation of average values of indices of vegetation in plots called EStadParcelas.exe. For the

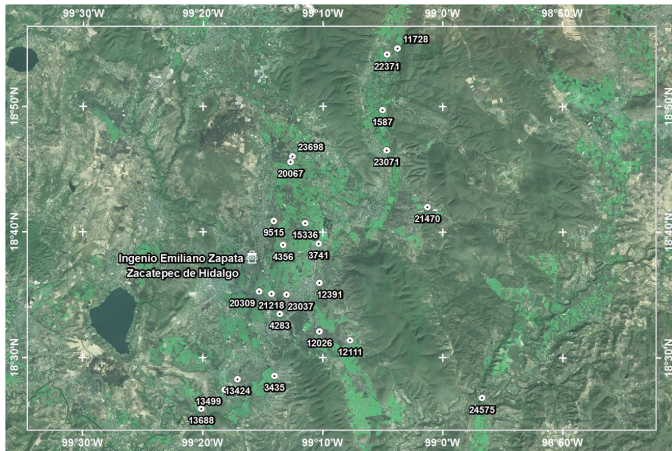


Figura 2. Zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata.
Figure 2. Supply area of Sugarmill Emiliano Zapata.

Metodología

Con objeto de relacionar parámetros biofísicos con el desarrollo del cultivo de caña de azúcar y su productividad, en la zona de abasto del Ingenio Emiliano Zapata, se seleccionaron 23 parcelas de control, donde se dio seguimiento al monitoreo del cultivo de caña de azúcar realizado por los supervisores de campo del ingenio; adicionalmente se obtuvo información (del área de SIG del ingenio) sobre la fecha de siembra, variedad, rendimiento, etc (Cuadro 1).

trial, 23 control plots with sugarcane cultivation were chosen, which are located in the supply area of sugarmill (Figure 2).

In addition, daily agrometeorological information (the same period in which the satellite images were acquired) was available from the INIFAP station available on the Web at: (www.clima.inifap.gob.mx), which is part of the network of agroclimatic stations in Morelos and is located at a height of 910 meters at the coordinates 18° 39' north latitude and 99° 12' west longitude, at the INIFAP Experimental Field, in Zacatepec, Hidalgo, Morelos.

Methodology

In order to relate biophysical parameters to the development of sugarcane cultivation and its productivity, 23 control plots were selected in the supply area of sugarmill Emiliano Zapata, where monitoring of the crop was carried out by the field supervisors of wit; information was also obtained (from the GIS area of the sugarmill) on the date of sowing, variety, yield, etc (Table 1).

It is noteworthy that performance is often measured in terms of the heavy amount of sugar cane delivered to the mill scale. Measurements were made in the 2009-2010 agricultural cycle; usually cane is harvested from mid-november to the beginning of may.

Cuadro 1. Características generales de las parcelas monitoreadas.
Table 1. General characteristics of the plots monitored.

Padrón (número)	Área (ha)	Ejido	Ciclo	Variedad	Tipo	Fecha de siembra	Fecha de corte	Rendimiento (t ha ⁻¹)
12026	3.15	Tlaquiltenango	Resoca 2	CP. 72-2086	Precoz	09-12-08	01-12-09	115.42
1587	3.93	Bonifacio García	Resoca 2	ITV. 92-1424	Precoz	27-02-09	16-02-10	119.45
23698	3.32	Acamilpa	Resoca 2	CP. 72-2086	Precoz	15-01-09	07-12-09	111.41
12391	5.37	Tlaquiltenango	Resoca 1	CP. 72-2086	Precoz	12-12-08	15-12-09	117.13
11728	3.29	Ticuman	Resoca 1	MY. 55-14	Media	15-04-09	10-05-10	118.42
13499	5.83	Tlatenchi	Resoca 1	CP. 72-2086	Precoz	16-12-08	07-01-10	117.83
13688	4.34	Tlatenchi	Resoca 1	CP. 72-2086	Precoz	07-01-09	02-02-10	124.8
4356	3.18	Jojutla	Soca	MEX. 79-431	Tardía	12-04-09	01-04-10	114.98
12111	3.07	Tlaquiltenango	Soca	MEX. 79-431	Tardía	01-05-09	16-05-10	127.37

Cuadro 1. Características generales de las parcelas monitoreadas (continuación).
Table 1. General characteristics of the plots monitored (continuación).

Padrón (número)	Área (ha)	Ejido	Ciclo	Variedad	Tipo	Fecha de siembra	Fecha de corte	Rendimiento (t ha ⁻¹)
3435	3.53	Higueron	Soca	MEX. 79-431	Tardía	05-02-09	05-04-10	124.62
9515	3.29	Santa Rosa Treinta	Soca	CP. 72-2086	Precoz	10-12-08	28-11-09	110.57
24575	3.72	Lorenzo Vázquez	Soca	CP. 72-2086	Precoz	28-12-08	25-11-09	97.43
20067	3.14	Acamilpa	Soca	CP. 72-2086	Precoz	16-01-09	30-12-09	122.08
23037	5.42	Tlaquiltenango	Soca	CP. 72-2086	Precoz	24-12-08	11-12-09	104.27
15336	4.26	Zacatepec	Planta	ITV. 92-1424	Precoz	09-12-08	14-03-10	110.11
20309	6.51	Jojutla	Planta	CP. 72-2086	Precoz	03-11-08	23-12-09	113.19
21218	3.13	Jojutla	Planta	ITV. 92-1424	Precoz	02-12-08	13-02-10	95.89
4283	4.12	Jojutla	Planta	CP. 72-2086	Precoz	08-12-08	19-12-09	113.38
13424	3.57	Tlaltenchi	Planta	CP. 72-2086	Precoz	11-12-08	13-01-10	110.54
3741	3.04	Huatecalco	Planta	MEX. 79-431	Tardía	24-12-08	15-03-10	116.18
21470	4.47	Temilpa Nuevo	Planta	ITV. 92-1424	Precoz	10-01-09	01-03-10	107.01
23071	3.71	Bonifacio García	Planta	MEX. 79-431	Tardía	30-01-09	19-04-10	113.3
22371	3.86	Ticuman	Planta	MY. 55-14	Media	13-04-09	07-05-10	123.45

Cabe mencionar que rendimiento suele medirse en función de la cantidad pesada de caña de azúcar entregado en la báscula de ingenio. Las mediciones se realizaron en el ciclo agrícola 2009-2010; usualmente la caña se cosecha desde mediados del mes de noviembre, hasta principios del mes de mayo.

Para este estudio se obtuvieron 30 imágenes del satélite Landsat 7ETM+ de fecha 06 de noviembre de 2008 a 04 de mayo de 2010 (periodo que comprende las distintas etapas de desarrollo del cultivo), las cuales fueron procesadas como ya se mencionó anteriormente.

Utilizando el programa IDRISI® se calcularon los valores de NDVI, Rouse *et al.* (1974), así como los de MSI, Rock *et al.* (1986), cuyos valores se obtienen de las reflectancias en las bandas roja (pr) (0.6 a 0.7 µm), infrarroja cercana (pi) (0.7 a 1.8 µm) e infrarrojo medio (pim) (1.8 a 80 µm), cuyas fórmulas para su cálculo son:

$$NDVI = \frac{\rho_i - \rho_r}{\rho_i + \rho_r} \quad 1) \quad \text{y} \quad MSI = \frac{\rho_{im}}{\rho_i} \quad 2)$$

Posteriormente, se calculó el valor promedio de ambos índices dentro de las 23 parcelas de control. Para lo cual se utilizó el software “EstadParcelas.exe”, que permite calcular

For this study 30 Landsat satellite images 7ETM+ dated 06 November 2008 at May 4, 2010 (period covered by the different stages of crop development) were obtained, which were processed as already mentioned.

Using the IDRISI® program, the values of NDVI, Rouse *et al.* (1974), as well as those of MSI, Rock *et al.* (pr) (0.6 to 0.7 µm), near infrared (pi) (0.7 to 1.8 µm) and medium infrared (pim) (1.8 to 80 µm), whose values are obtained from the reflectances. Formulas for their calculation are:

$$NDVI = \frac{\rho_i - \rho_r}{\rho_i + \rho_r} \quad 1) \quad \text{y} \quad MSI = \frac{\rho_{im}}{\rho_i} \quad 2)$$

Subsequently, the average value of both indices was calculated within the 23 control plots. For this, the software “EstadParcelas.exe” was used, which allows to calculate the average value of all the pixels located within the limits of a particular plot, defined by its vectors or “shapes”).

Likewise, the evapotranspiration of the ETc crop, according to what was proposed by Allen *et al.* (2006), including the estimate of Kc (development coefficient of the crop) as a function of NDVI, as proposed by Calera and González (2007), whose formula for estimation, valid mainly for annual crops, is:

el valor promedio de todos los píxeles ubicados dentro de los límites de una parcela en particular, definidos por sus vectores o “shapes”).

Asimismo, se calculó la evapotranspiración del cultivo ETc, acorde con lo propuesto por Allen *et al.* (2006), incluyendo la estimación del Kc (coeficiente de desarrollo del cultivo) en función del NDVI, según lo propuesto por Calera y González (2007), cuya fórmula para su estimación, válida principalmente para cultivos anuales, es:

$$Kc = 1.15 * NDVI + 0.17 \quad 3)$$

La evapotranspiración de referencia ETo se obtuvo de la estación agrometeorológica INIFAP, dato estimado con la fórmula de Penman-Monteith, que corresponde al valor diario acumulado en el periodo entre fechas Landsat. Por lo que fue posible calcular en forma aproximada la variable ETc, con:

$$ETc = Kc * ETo \quad 4)$$

Resultados y discusión

A partir de las relaciones entre el Kc y el NDVI en el ciclo agrícola 2009-2010, se estimó mediante la función 3 y 4, el requerimiento hídrico de la caña de azúcar en las parcelas de estudio. Como referencia en el Cuadro 2, se muestran los resultados de las estimaciones realizadas en la parcela con número de cuenta 12 026. De donde se obtiene un valor acumulado para la ETc de 863.5 mm. Cabe mencionar que dichas funciones fueron validadas en México por Palacios *et al.* (2011), en el distrito de riego Río Mayo.

En la Figura 3, se observa la variación de valores de NDVI obtenidos como promedio en cinco parcelas de estudio. Se registran valores de NDVI entre -0.1 y 0.7, en similitud a lo reportado por autores como Knop (2007) y Rahman *et al.* (2004), para un dosel verde y totalmente desarrollado de caña de azúcar. Cabe mencionar que el valor negativo se debe la condición de suelo desnudo, cuando la planta aun no emerge.

De las 23 parcelas de control se calcularon los valores promedio de NDVI y MSI, como indicadores de productividad y de efectividad del riego, con objeto de correlacionar los valores medios de los índices con los rendimientos reportados por el ingenio. Los resultados se muestran en el Cuadro 3, donde se incluye también la evapotranspiración del cultivo.

$$Kc = 1.15 * NDVI + 0.17 \quad 3)$$

The ETo reference evapotranspiration was obtained from the INIFAP agrometeorological station, which is estimated using the Penman-Monteith formula, which corresponds to the accumulated daily value in the period between Landsat dates. As a result, it was possible to calculate the ETc variable roughly, with:

$$ETc = Kc * ETo \quad 4)$$

Results and discussion

From the relations between Kc and NDVI in the 2009-2010 crop cycle, the water requirement of sugarcane in the study plots was estimated by equation 3 and 4. As a reference in Table 2, the results of the estimates made in the plot with account number 12 026 are shown. From this, a cumulative value for the ETc of 863.5 mm is obtained. It should be mentioned that these functions were validated in Mexico by Palacios *et al.* (2011), in the Río Mayo irrigation district.

Cuadro 2. Cálculo de Kc a partir de valores de NDVI en una parcela de estudio.

Table 2. Calculating Kc from NDVI values in a study plot.

Días	Diferencia	NDVI	ETo (mm)	Kc estimado	ETc (mm)
16	16	0.21747	63.8	0.42	26.8
32	16	0.32047	96.3	0.539	51.9
48	16	0.35625	90.1	0.58	52.2
64	16	0.27756	83.4	0.489	40.8
80	16	0.38324	69.5	0.611	42.4
96	16	0.48594	72.7	0.729	53
112	16	0.54334	62.6	0.795	49.8
128	16	0.49367	64.8	0.738	47.8
144	16	0.60085	74.5	0.861	64.1
160	16	0.61549	83.7	0.878	73.5
176	16	0.52198	85.2	0.77	65.6
208	32	0.54169	144.3	0.793	114.4
224	16	0.56296	72.6	0.817	59.3
272	48	0.49662	164.4	0.741	121.8

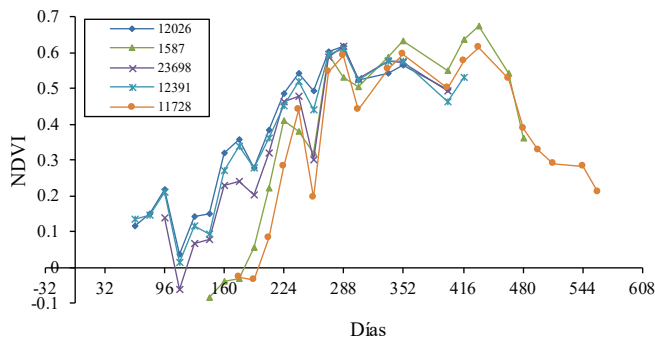


Figura 3. Variación de valores de NDVI en cinco parcelas de la zona de estudio.

Figure 3. Variation of NDVI values in five plots in the study area.

In the Figure 3, the variation of NDVI values obtained on average in five study plots is observed. NDVI values are recorded between -0.1 and 0.7, similar to those reported by authors such as Knop (2007); Rahman *et al.* (2004), for a green and fully developed canopy of sugar cane. It should be mentioned that the negative value is due to the condition of bare soil, when the plant does not yet emerge.

In each of the 23 control plots the average values of NDVI and MSI were calculated as indicators of productivity and irrigation effectiveness, in order to correlate the average values of the indices with the yields reported by the sugarmill. The results are shown in Table 3, which also includes crop evapotranspiration.

Cuadro 3. Valores calculados de ETc, NDVI y MSI.

Table 3. Calculated values of ETc, NDVI and MSI.

Número	Parcela	Área (ha)	ETo (mm)	ETc (mm)	NDVI (media)	MSI (media)	Rendimiento ingenio (t ha ⁻¹)	Rendimiento estimado (t ha ⁻¹)
1	12026	3.15	1227.9	863.5	0.36903	0.80426	115.4	118.46
2	1587	3.93	1145.2	858.2	0.3803	0.78329	119.5	120.44
3	23698	3.32	1164.1	787	0.34294	0.82038	111.4	113.86
4	12391	5.37	1273.8	879.9	0.36155	0.81049	117.1	117.14
5	11728	3.29	1427.3	961.1	0.36822	0.79879	118.4	118.32
6	13499	5.83	1250.4	880.6	0.36149	0.79794	117.8	117.13
7	13688	4.34	1297.6	915.5	0.38484	0.77357	124.8	121.24
8	4356	3.18	1328.5	923.6	0.37575	0.7703	115	119.64
9	12111	3.07	1492.1	1045.2	0.42134	0.76205	127.4	127.67
10	3435	3.53	1301.7	960.6	0.37896	0.7681	124.6	120.21
11	9515	3.29	1142.2	788	0.34917	0.82232	110.6	114.96
12	24575	3.72	930.2	557.9	0.25724	0.84106	97.4	98.77
13	20067	3.14	1250.4	895.2	0.38454	0.75035	122.1	121.19
14	23037	5.42	984.4	609.7	0.28536	0.86847	104.2	103.72
15	15336	4.26	1217.5	863.1	0.32225	0.80825	110.1	110.22
16	20309	6.51	1188	830.6	0.32615	0.81947	113.2	110.91
17	21218	3.13	934.5	603.4	0.23933	0.88101	95.9	95.62
18	4283	4.12	1179	818	0.33058	0.81071	113.4	111.69
19	13424	3.57	1140.7	771.7	0.3198	0.84415	110.5	109.79
20	3741	3.04	1306.3	921.4	0.34046	0.80018	116.2	113.43
21	21470	4.47	938.2	686.2	0.30194	0.83891	107	106.64
22	23071	3.71	1322.3	902.2	0.34599	0.7752	113.3	114.4
23	22371	3.86	1344.4	988	0.39713	0.74523	123.4	123.41

Utilizando los datos del cuadro 3, se han obtenido relaciones entre los valores promedio de NDVI, MSI y ETC, con el rendimiento reportado en cada parcela de control, observándose una aceptable correlación entre estas variables. Un estudio relacionado con la estimación de productividad y biomasa fue realizado en Brasil por Simões *et al.* (2005), utilizando espectrometría en campo, simuló bandas equivalentes del Landsat ETM+, demostrando la alta correlación que existe entre productividad y biomasa con el NDVI, alcanzando un valor de R^2 de 0.88. En el caso de México también se han obtenido relaciones del mismo tipo para el cultivo de caña de azúcar en la Huasteca Potosina, Aguilar *et al.* (2010), reportaron que el NDVI es útil como herramienta de diagnóstico en un momento dado, y en serie temporal, para caracterizar el rendimiento y productividad del cultivo de caña de azúcar.

En las Figuras 4 y 5 se muestran estas relaciones donde se aprecia que hay una relación directa entre los valores de NDVI y los valores de rendimiento. Así también, se observa que la relación entre el MSI y el rendimiento no es lineal, ya que con forme aumenta el estrés hídrico, el rendimiento disminuye.

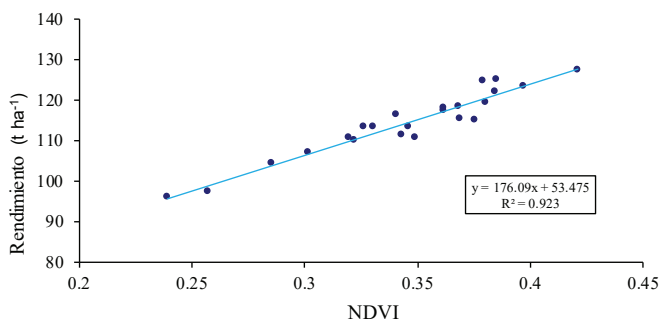


Figura 4. Relación entre NDVI y el rendimiento de la caña de azúcar.

Figure 4. Relationship between NDVI and sugarcane yield.

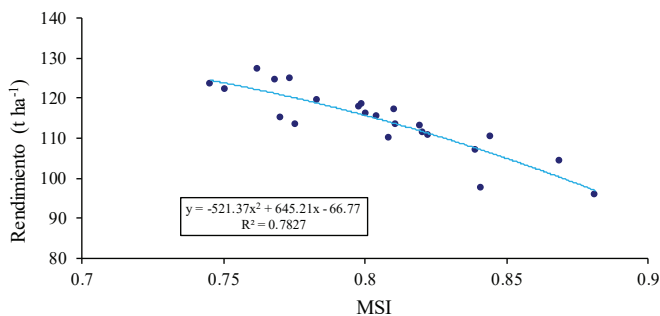


Figura 5. Relación entre MSI y el rendimiento de caña de azúcar.

Figure 5. Relationship between MSI and sugarcane yield.

Using data from Table 3, the mean values of NDVI, MSI and ETC were obtained with the yield reported in each control plot, with an acceptable correlation between these variables. A study related to the estimation of productivity and biomass was carried out in Brazil by Simões *et al.* (2005), using field spectrometry, simulated equivalent bands of Landsat ETM+, demonstrating the high correlation between productivity and biomass with NDVI, reaching an R^2 value of 0.88. In the case of Mexico have also obtained relationships of the same type for the cultivation of sugar cane in the Huasteca Potosina, Aguilar *et al.* (2010), reported that NDVI is useful as a diagnostic tool at a given time, and in a time series, to characterize the yield and productivity of the sugarcane crop.

These relationships are shown in Figures 4 and 5 where it is seen that there is a direct relationship between the NDVI values and the yield values. Also, it is observed that the relationship between the MSI and the yield is not linear, as water stress increases, yield decreases.

Also follows that a reason for the variation of NDVI values is largely due to the effect of moisture stress, motivated by poor irrigation in the plots analyzed. For this, the MSI has been correlated with the NDVI and, as can be observed in Figure 6, there is a high correlation between these indexes.

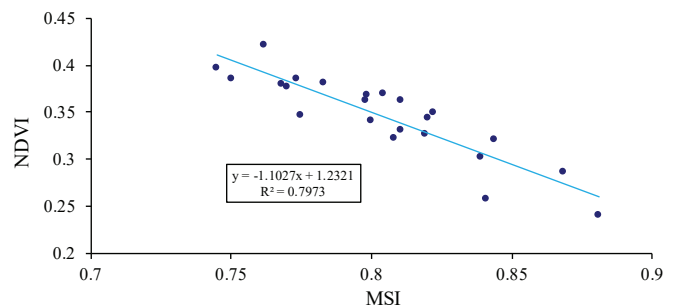


Figura 6. Relación entre MSI y NDVI.

Figure 6. Relationship between MSI and NDVI.

In the Figure 7 shows a direct linear relationship between ETC and yield, since as evapotranspiration increases, more photosynthesis and, consequently, more biomass and yield of sugarcane are expected. It was also found that the relationship between the MSI and the ETC is not linear, since the higher water stress less evapotranspiration of the crop, as shown in Figure 8.

También se deduce que una razón de la variación de los valores de NDVI se debe en gran parte al efecto del estrés de humedad, motivado por un riego deficiente en las parcelas analizadas. Para ello se ha correlacionado el MSI con el NDVI y como se puede observar en la Figura 6, hay una alta correlación entre dichos índices.

En la Figura 7 se observa una relación lineal directa entre la ETc y el rendimiento, ya que a medida que aumenta la evapotranspiración, se espera más fotosíntesis y, en consecuencia, más biomasa y rendimiento de caña de azúcar. También se encontró que la relación entre el MSI y la ETc no es lineal, ya que a mayor estrés hídrico menor evapotranspiración del cultivo, tal como se aprecia en la Figura 8.

Una vez obtenido el modelo de mejor ajuste, se estimó que el rendimiento promedio en la zona de estudio fue de 114.3 t ha⁻¹. La SAGARPA; a través, del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2009) indicó que el rendimiento promedio de caña de azúcar reportado en campo en el estado de Morelos en el periodo 1998-2008 fue de 113.5 t ha⁻¹ y particularmente en el año 2009, de 115.4 t ha⁻¹, por lo que se considera que los resultados obtenidos se encuentran dentro de un buen rango de estimación.

Cabe mencionar que el valor de la superficie cosechada de caña de azúcar en el ciclo 2009-2010 fue de 10 664 ha (base de datos de SIG del ingenio). Ellos reportan para dicha superficie un volumen de producción de 1 154 035 t, al cierre de la zafra. Este valor al ser comparado con el estimado del modelo de predicción de 1 219 047 t, indica que hubo una sobreestimación de 5.3% que equivalen a 65 012 t, lo que permite conocer la efectividad de las estimaciones realizadas en este estudio.

Conclusiones

En el presente trabajo se ha logrado una estimación de rendimiento de caña de azúcar a partir de modelos lineales que requieren como dato de entrada valores del índice de vegetación (NDVI), índice de estrés de humedad (MSI) y de evapotranspiración del cultivo (ETc). Se ha observado una relación directa entre el rendimiento de caña de azúcar y los mencionados índices (estimados a partir de imágenes Landsat 7 ETM+). Las variaciones de los índices reproducen adecuadamente los cambios en el rendimiento de caña de azúcar.

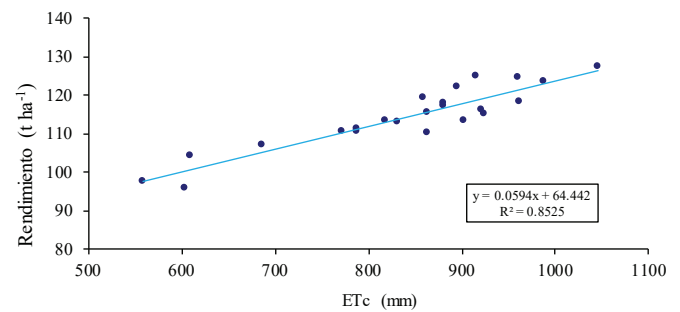


Figura 7. Relación entre ETc y el rendimiento de caña de azúcar.

Figure 7. Relationship between ETc and sugarcane yield.

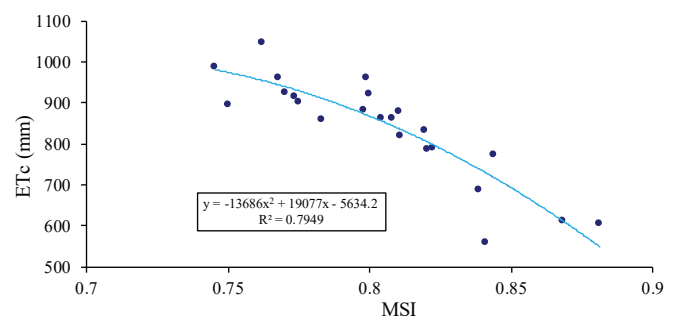


Figura 8. Relación entre MSI y ETc.

Figure 8. Relationship between MSI and ETc.

Once the best fit model was obtained, it was estimated that the average yield in the study area was 114.3 t ha⁻¹. The SAGARPA; (SIAP, 2009) indicated that the average yield of sugarcane reported in the field in the state of Morelos in the period 1998-2008 was 113.5 t ha⁻¹ and particularly in the year 2009, of 115.4 t ha⁻¹, reason why the results obtained are considered within a good range of estimation.

It should be mentioned that the value of the area harvested from sugar cane in the 2009-2010 cycle was 10 664 ha (sugarmill SIG database). They report for this area a production volume of 1 154 035 t, at the close of the harvest. This value, when compared to the estimate of the prediction model of 1 219 047 t, indicates that there was an overestimation of 5.3%, equivalent to 65 012 t, which allows to know the effectiveness of the estimates made in this study.

Conclusions

In the present work an estimation of yield of sugar cane has been obtained from linear models that require values of input data as NDVI vegetation index, moisture stress index (MSI)

El uso combinado de imágenes satelitales con información meteorológica y Sistemas de Información Geográfica (SIG), permite a los usuarios de los sistemas de riego, estimar el consumo de agua de sus cultivos, dar seguimiento al desarrollo vegetativo y estimar en forma aproximada el rendimiento.

Finalmente, se considera que la predicción de rendimientos de cultivos debe ser el comienzo de una serie de técnicas a desarrollar, con gran potencial de aplicación en las seis regiones cañeras del país. De esta forma se genera información base que puede aplicarse en la planificación y manejo de la producción agropecuaria en busca de dar respuestas a la productividad y competitividad.

Agradecimientos

A los agricultores cooperantes de las parcelas piloto de caña de azúcar, así como a los técnicos encargados de la estación agrometeorológica INIFAP. A todos ellos nuestro agradecimiento. Al CONACYT por financiar el proyecto de investigación, del cual este artículo forma parte.

Literatura citada

- Abdel-Rahman, E. M. and Ahmed, F. B. 2008. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing*. 29(13): 3753-3767.
- Aguilar, N.; Galindo, G.; Fortanelli, J. y Contreras, C. 2010. Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 14(2):49-65.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 2006. *Evapotranspiración del cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO, Riego y Drenaje. 56. Roma, Italia. 298 p.
- Calera, B. A. y González, J. 2007. Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal. Relaciones operativas para la obtención de mapas de estos parámetros de las imágenes de satélite. Grupo de Teledetección y SIG, IDR, UCLM. Documento de PLEIADeS. 194 p.
- Fortes, C. 2006. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. *International Journal of Remote Sensing*. 27 (7): 395-412.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. 4ª ed. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, D. F. 217 p.
- Hatfield, J. L.; Gitelson, A. A.; Schepers, J. S. and Walthall, C. L. 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agron. J.* 100(3):117-131.

and crop evapotranspiration (ETc). A direct relationship between sugarcane yield and these indexes (estimated from Landsat 7 ETM + images) has been observed. Variations in the indices adequately reproduce changes in yield of sugarcane.

The combined use of satellite images with meteorological information and Geographic Information Systems (SIG), allows users of irrigation systems to estimate the water consumption of their crops, monitor vegetative development and estimate yields.

Finally, it is considered that the prediction of crop yields should be the beginning of a series of techniques to be developed, with great potential of application in the six sugarcane regions of the country. In this way, basic information is generated that can be applied in the planning and management of agricultural production in order to give answers to productivity and competitiveness.

End of the English version



- Inman-Bamber, N. G. and Smith, D. M. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Fields Crops Research*. Australia. 92(2):185-202.
- Knop, I. 2007. Precision agriculture options for the Australian sugarcane industry. AM SRDC Technical Report 3/2007, Sugar Research and Development Corporation. 124 p.
- Krishna, R. P. V. 2002. Remote sensing: a technology for assessment of sugarcane crop acreage and yield. *Sugar Tech*. 4(3):97-101.
- Palacios, S. L. A.; Paz, P. F.; Oropeza, M. J. L.; Figueroa, S. B.; Martínez, M. M.; Ortiz, S. C. A. y Exebio, G. A. 2006. Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+. *Agrociencia*. 40(5):613-626.
- Palacios, V. E.; Palacios, S. J. E. y Palacios, S. L. A. 2011. Agricultura de riego asistida con satélites. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería Hidráulica en México*. 2(2):69-81.
- Rahman, M. R.; Islam, A. H. M. H. and Rahman, M. A. 2004. NDVI derived sugarcane area identification and crop condition assessment. *Planplus*. 1(2):1-12.
- Rock, B. N.; Vogelmann, J. E.; Williams, D. L., Voglemann, A. F. and Hoshisaki, T. 1986. Remote Detection of Forest Damage. *Bio Science*. 36(7):439-445.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A. and Deering, D. W. 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351*. Washington, D. C. 1:309-317.
- Rudorff, B. F. T. and Batista, G. T. 1990. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. *Remote Sensing Environ*. 33(3):183-192.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2010. Descripción de la cadena agroalimentaria de caña de azúcar. SIAP-SAGARPA. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>.

Simões, M. D. S.; Rocha, J. V. and Lamparelli, R. A. 2005. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Brazil). 62(3):199-207.

Soria, R. J. 2004. Methodology for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central Mexico. *Investigaciones Geog.* 55:61-78.

Ueno, M.; Kawamitsu, Y.; Sun, L. and Maeda, K. 2005. Combined applications of NIR, RS, and GIS for sustainable sugarcane production. *Sugarcane Inter.* 23(4):8-11.

Zhang, P. and Anderson, B. 2005. Potential monitoring of crop production using a satellite-based Climate-Variability Impact Index. *Agric. Forest Meteorol.* 132(3):344-358.