

Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México

Agroecological zoning and potential yield estimation of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in the state of Tabasco, México

Rivera-Hernández, B.;^{1*} Aceves-Navarro, L. A.;²
Juárez-López, J. F.;² Palma-López, D. J.;²
González-Mancillas, R.² y González-Jiménez, V.²

¹ Universidad Popular de la Chontalpa
Carretera Cárdenas-Huimanguillo
Km 2. R/a. Pazo y Playa, Cárdenas, Tabasco.

² Colegio de Postgraduados, Campus-Tabasco
Periférico Carlos A. Molina Km 3
Carretera Cárdenas Huimanguillo, Tabasco.

*Correspondencia: benigno.rivera@upch.edu.mx

Resumen

El estado de Tabasco es el principal productor de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en México, mismo que ha perdido en los últimos cinco años cerca del 45% de la superficie dedicada a este cultivo. Razón por la cual, las políticas actuales de desarrollo rural se enfocan a dirigir todo tipo de apoyos, especialmente los económicos, hacia las áreas con mayor potencial productivo para diferentes cultivos, entre ellos, la yuca. Derivado de esta política y del interés del gobierno del estado de Tabasco, se realizó el presente estudio, con los objetivos de conocer las áreas con mayor potencial productivo en el estado y estimar el rendimiento potencial esperado del cultivo de la yuca. Para ello, se utilizó el procedimiento de zonificación agro-ecológica (ZAE) propuesto por la FAO para áreas muy aptas y para una situación de alta inversión en condiciones de agricultura de temporal. Se analizaron cuatro variables climáticas y seis

Abstract

The state of Tabasco is the main cassava (*Manihot esculenta* Crantz) producer in Mexico. About 45% of the surface area dedicated to this crop has been lost in the last five years. The current state government policies for rural development are being focused on granting all kinds of support, mainly economic ones, to areas with the greatest productive potential for different crops, among which, the cassava is included. This research is based on this policy and on the interest of the state government of Tabasco to know the highest productive potential areas for cassava in the state and their corresponding potential expected yields. To do this, the Agro-ecological zoning (AEZ) procedure proposed by FAO, was used to determine the appropriate regions to produce cassava and high investment situations under rainfed conditions. Four climatic variables and six soil properties were analyzed. The

propiedades edafológicas. El análisis de las variables climáticas y edafológicas (físicas y químicas) y su posterior representación cartográfica mostraron que en el estado de Tabasco existen 476,617 hectáreas con alto potencial edafoclimático para cultivar yuca, con rendimientos potenciales de 42.3 t ha⁻¹.

Palabras clave

Clima, periodo de crecimiento, rendimiento, suelo, yuca.

analysis of climatic and soil (physical and chemical) variables and its later cartographic representation showed 476,617 hectares in the state of Tabasco with high soil-climate potential for cassava growing and estimated potential yields of 42.3 t ha⁻¹.

Key words

Cassava, Climatic, growing period, soil, yield.

Introducción

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) pertenece a la familia *Euphorbiaceae*, la cual está constituida por unas 7,200 especies que se caracterizan por el desarrollo de vasos laticíferos compuestos por células secretoras o galactocitos, que producen una secreción lechosa (USAID, 2010). Asimismo, es ampliamente cultivada en América Latina, África tropical y Asia. Es el alimento básico de casi mil millones de personas en 105 países, incluido México. Es, también, la fuente de almidón más barata que existe en el mundo, al ser utilizada en más de 300 productos industriales (FAO, 2008).

Dentro de las raíces y tubérculos (yuca, papa, camote y ñame) la yuca es la que presentará la mayor tasa de crecimiento de consumo anual hasta el 2020, con 1.9% y el segundo lugar en término de producción de forraje, con 0.95% (Scott *et al.*, 2000). A pesar del rango de adaptación del cultivo a zonas tropicales y subtropicales, en México sólo se cultiva en siete estados (Tabasco, Morelos, Michoacán, Yucatán, Veracruz, Guerrero y Jalisco). La producción nacional de yuca fresca en el año 2010 fue de 18,750 toneladas (SIAP-SAGARPA, 2011), las cuales son insuficientes para satisfacer la demanda interna del país; lo anterior, debido a que en el mismo año se importaron 1,476 toneladas de almidón de yuca (REDIEX, 2010) lo que supone que México debería producir unas 333,576 toneladas de raíces, si consideramos la conversión de yuca “raíz” a almidón (Alarcón y Dufour, 1998). No obstante, en el mismo año 2010 los dos socios comerciales más importantes de México (Estados Unidos y Canadá) también importaron 34,664 y 15,960 toneladas de almidón de yuca, respectivamente (REDIEX, 2010).

Por otra parte, los rendimientos de yuca “raíz”, en México son competitivos tanto a nivel nacional (13.52 t ha⁻¹), como estatal (12.44 t ha⁻¹); ambos superan a los rendimientos a nivel mundial (10.5 t ha⁻¹) (Ponce y Oña, 2009). En México, 79.80% de la producción nacional de yuca se concentra en el estado de Tabasco. Sin embargo, en los últimos cinco años (2005-2009) el estado ha perdido cerca del 45% de su superficie dedicada a este cultivo (SIAP-SAGARPA, 2011). La pérdida de la superficie obedece a una serie de problemas que involucran el manejo agronómico, la transferencia de tecnología, limitada capacitación, insuficientes apoyos económicos y desconocimiento de las áreas con mayor aptitud productiva para este cultivo, entre otros. La reducción de la superficie

cultivada con yuca incrementó el desempleo en el estado, ya que para algunos productores el cultivo representaba la principal fuente de ingreso y/o trabajo; asimismo, disminuyó la entrada de divisas al estado. Por lo que el gobierno, en su Plan Estatal de Desarrollo (2006-2012), menciona la necesidad de inversión en esta agrocadena. Sin embargo, la política del estado para disminuir los problemas antes mencionados, será mediante apoyos dirigidos; es decir, el gobierno orientará los apoyos económicos en áreas que ambientalmente aseguren la obtención de cosechas rentables y la recuperación de la inversión; por ello, existe la necesidad de conocer dónde se localizan estas áreas en el estado.

La FAO (1978) propone la metodología de Zonificación Agro-Ecológica (ZAE), para definir zonas con alto potencial productivo, con base en combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros usados en la definición se centran en los requerimientos climáticos, edáficos y manejo de los cultivos. El estado de Tabasco posee una gran diversidad de recursos naturales que hacen necesario identificar las zonas agroecológicas contrastantes, de acuerdo con el potencial productivo para el cultivo de la yuca. En lo referente al recurso suelo, el estado tiene 81 subunidades edafológicas, (Palma-López *et al.*, 2007).

Por lo que se refiere al clima, Tabasco presenta tres tipos: Cálido húmedo con lluvias todo el año (Af), Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am) y cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw) (García, 2004); y presenta siete zonas fisiográficas: sierra, calcárea, lomeríos, llanura aluvial, vega de río, llanura de inundación y costa, que se definen a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano (Palma *et al.*, 2007).

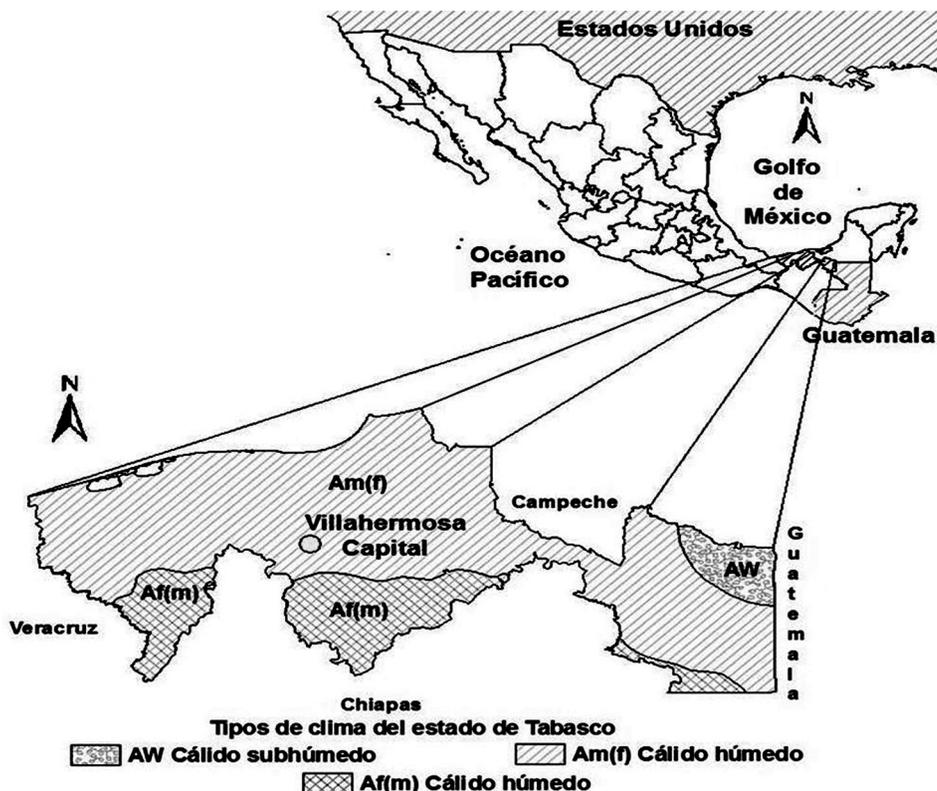
De acuerdo al régimen de precipitación presente en el estado, se diferencian tres épocas: de secas (de marzo a mayo), de lluvias (de junio a octubre) y de nortes (de noviembre a febrero) (INEGI, 2008). La yuca es un cultivo importante en el estado de Tabasco y, en general para el país, debido a que existe una demanda importante de esta raíz. Asimismo, es un cultivo promisorio para exportar debido al déficit interno que existe en los socios comerciales del país. Por lo que, el presente trabajo, tiene como objetivos conocer las áreas con mayor potencial productivo y estimar el probable rendimiento del cultivo de yuca en el estado de Tabasco.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estado de Tabasco se ubica geográficamente en la Región Sureste de la República Mexicana, entre las latitudes 18°38' y 17°15' N y las longitudes -90°38' y -94°07' W; consta de una superficie de 24,751 km² (figura 1). Para la determinación de las zonas de alto potencial productivo para el cultivo de yuca, se utilizó la metodología de Zonificación Agroecológica propuesta por la FAO (1978) y que ha sido utilizada en otros trabajos de investigación (Guillén, 1973; Fischer y Makowski, 2000; Barbosa *et al.*, 2009).

Figura 1
Ubicación geográfica del estado de Tabasco en la República Mexicana.



Selección y requerimientos bioclimáticos del cultivo de la yuca

Las variables que se consideraron para determinar las zonas con alto potencial productivo fueron: clima y suelo, por la relación directa que guardan con el rendimiento del cultivo de yuca. Para determinar las zonas con alto potencial climático y edafológico se tomaron los valores óptimos establecidos por el ECOCROP (2007) y Cadavid (2002) para el cultivo de yuca (cuadro 1). Los valores de las variables climáticas se compararon con los valores de cada una de las estaciones meteorológicas seleccionadas (cuadro 2). Aquellas estaciones que cumplieron con los valores óptimos se denominaron *zonas con alto potencial climático*.

Como parte del proceso de selección de la información, se utilizó la base de datos del programa ERIC III (IMTA, 2003), que permitió analizar los registros diarios de temperatura y precipitación de 93 estaciones meteorológicas presentes en el estado de Tabasco, utilizando como criterios la serie histórica de los datos y su distribución geográfica. Para complementar la información reportada por ERIC III (IMTA, 2003), se acudió a la base

de datos reportada por García (2004), para las variables de precipitación y temperaturas, buscando que cubriesen de manera regular al estado de Tabasco. De esta manera, se seleccionaron 35 estaciones meteorológicas que fueron utilizadas para realizar la zonificación del cultivo de la yuca (cuadro 2).

Cuadro 1

Variables seleccionadas para definir zonas con alto potencial productivo para el cultivo de yuca en el estado de Tabasco, México.

Clima	Óptima		Suelo	Óptima	
	Mínima	Máxima		Mínima	Máxima
Temperatura (°C)	20	29	pH	5.5	8
Precipitación (mm)	1000	2500°	Profundidad (cm)	50	150
Altitud (msnm)		2000	Textura	Media y ligera	
Fotoperiodo (horas)	10	12°	Fertilidad	Moderada	
Periodo de crecimiento (días)	215	287°	Salinidad	Baja(<4 dS/m)	
			Drenaje	Bien Muy drenado	

°Cadavid (2002).

Cuadro 2

Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas selectas en el estado de Tabasco para zonificación del cultivo de yuca.

<i>Municipios</i>	<i>Estación</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Altitud</i>
Balancán	Apatzingán	17°35'59.23"	-91°04'30.00"	65
	Balancán	17°48'35.23"	-91°32'12.23"	18
	El Triunfo	17°25'23.24"	-91°29'42.23"	60
	San Pedro	17°56'33.26"	-92°01'28.73"	40
Cárdenas	Campo ew-75	17°58'59.22"	-93°34'59.92"	8
	Cárdenas	17°59'59.22"	-93°22'59.94"	21
Centla	Vicente Guerrero	18°24'19.20"	-93°21'59.95"	8
Centro	Macultepec	18°04'29.20"	-93°10'29.97"	10
	Pueblo Nuevo	17°36'47.25"	-92°47'54.03"	60
	Villahermosa	17°43'59.23"	-91°46'00.19"	10
Comalcalco	Comalcalco	17°50'19.23"	-93°54'07.86"	20
Cunduacán	Cunduacán	18°10'17.19"	-93°03'42.00"	26
	Samaria	18°04'59.19"	-92°02'00.11"	17
	Tulipán	17°37'53.24"	-92°32'12.07"	16
	Emiliano Zapata	17°44'29.21"	-92°55'33.01"	16
Huimanguillo	Francisco Rueda	18°07'59.20"	-94°01'29.84"	7
	La Venta	17°36'29.23"	-92°41'00.03"	20
	Mezcalapa	18°09'59.20"	-92°50'00.03"	50
	Mosquitero	17°45'23.21"	-92°36'18.06"	32
	Paredón	17°37'59.21"	-93°24'59.94"	12
Jalpa de Méndez	Jalpa de Méndez	17°42'59.22"	-93°37'59.91"	10
Jonuta	Jonuta	17°22'29.23"	-92°45'00.05"	13
Macuspana	Km 662	18°23'59.20"	-93°12'00.88"	100
	Macuspana	17°45'47.23"	-93°23'05.93"	60
	Tepetitán	17°49'59.20"	-92°52'00.03"	10
Paraíso	Paraíso	17°59'59.21"	-93°15'59.96"	0
Tacotalpa	Dos Patria	17°47'29.24"	-91°09'30.27"	60
	Lomas Alegres	17°27'47.24"	-92°42'37.05"	70
	Oxolotán	17°33'47.23"	-92°57'06.01"	210
	Tapijulapa	17°28'23.25"	-91°25'36.23"	167
	La Huasteca	17°49'34.21"	-92°23'15.09"	16
Teapa	Teapa	18°06'29.19'	-93°20'41.93"	72
	Boca del Cerro	17°59'47.20"	-92°55'42.01"	100
Tenosique	Tenosique	18°23'41.20"	-92°54'00.03"	32
	Frontera	18°30'59.17"	-92.38'00.05"	1

Inventario climático

La elaboración de un inventario climático, de acuerdo a los lineamientos de la FAO (1981), consta de dos etapas: 1) definición de las divisiones climáticas mayores, y 2) obtención de los periodos de crecimientos.

Divisiones climáticas mayores

Las divisiones climáticas fueron definidas con base en los requerimientos térmicos del cultivo, que limitan su distribución a escala global. Para establecer las divisiones climáticas mayores, se consideró el efecto de la altitud en espacio y tiempo, sobre la temperatura media.

Periodo de crecimiento

El criterio utilizado para definir el periodo o estación de crecimiento fue el reportado por la FAO (1978), que consiste en el periodo en días durante el cual la precipitación es igual o mayor a un medio de la evapo-transpiración potencial ($E_{tp}/2$). Este cálculo lo realiza automáticamente el programa AGROCLIM para cada estación meteorológica (Aceves-Navarro *et al.*, 2008).

Inventario edafológico

La segunda fase del procedimiento de zonificación agroecológica propuesto por la FAO (1978), consiste en la evaluación del recurso suelo. En el presente estudio se utilizó la información reportada en el Plan de Uso Sustentable de los Suelos de Tabasco, de la Fundación Produce Tabasco, que contiene los resultados generados en los últimos 25 años, sobre el conocimiento de los suelos; aborda aspectos físicos y químicos, clasificados de acuerdo a la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Organización de la Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y la Cultura (FAO/UNESCO) (Palma-López *et al.*, 2007). Las propiedades de cada una de las subunidades de los suelos, se compararon con las propiedades de suelo que requiere el cultivo de yuca (mencionadas en el cuadro 1). Aquellas subunidades de suelo que cumplían con los requisitos se denominaron *subunidades con alto potencial edafológico*.

Información cartográfica

La herramienta que se utilizó para la elaboración de la cartografía fue el programa ArcView SIG (Sistema de Información Geográfica) versión 9.3 (ESRI, 2004); éste, consiste en un sistema de mapeo computarizado que relaciona lugares con información agroclimática iguales a las del cultivo de yuca, las cuales se denominaron áreas con alto potencial productivo. Se generaron bases de datos con los promedios de las variables climáticas de las estaciones meteorológicas selectas, considerando sólo las variables del cuadro 1. Las bases de datos se almacenaron en el SIG, en el cual se construyeron los mapas de isolíneas a escala 1:250,000.

La interpolación para el cálculo de isolíneas fue realizada con el método del promedio del Inverso de Cuadrado de las Distancias, incluido dentro del programa ArcView.

Para conocer la dependencia geográfica que existe entre los valores interpolados se utilizó el método de interpolación espacial, debido a que asocia al término de Mejor Predictor Lineal Insesgado (MPLI) y es el más adecuado en el sentido de que minimiza la varianza del error en la predicción (Nozica *et al.*, 1998). Con el uso del programa SIG se realizó el álgebra de mapas de temperaturas, precipitación y periodo de crecimiento, obteniéndose las zonas con alto potencial climático. Para el caso del recurso suelo, se agruparon la subunidades con alto potencial productivo; para ello se utilizaron las figuras geométricas de los suelos del Plan de Uso Sustentable del Estado de Tabasco (Palma-López *et al.*, 2007). Posteriormente, se realizó el álgebra de mapa de las zonas con alto potencial climático y las zonas con alto potencial edafológico, dando origen al mapa con alto potencial edafoclimático para el cultivo de yuca.

Estimación de rendimiento potencial para el cultivo de la yuca

Para conocer este aspecto se utilizó el método de Zonas Agro-ecológicas (ZAE) propuesto por FAO (1978). En el presente trabajo se utilizó este procedimiento, adaptándolo y modificándolo para estimar el rendimiento potencial de la yuca en Tabasco. La estimación de rendimientos máximos por el método ZAE de la FAO se basa en la ecuación 1.

$$Y = B_n * H_i$$

Ec. 1

Donde: Y = Rendimiento máximo sin restricciones ($t\ ha^{-1}$), B_n = Producción de biomasa neta ($t\ ha^{-1}$) y H_i = Índice de cosecha (adimensional).

La biomasa neta (B_n) se entiende como la materia seca total y el rendimiento (Y) como la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas, con un suministro adecuado de agua y nutrientes. Siendo el índice de cosecha (H_i); por lo tanto, una parte proporcional de la biomasa neta total.

La biomasa neta (B_n) en $kg\ ha^{-1}$ para la yuca se calculó con la ecuación 2.

$$B_n = \frac{0.36 * b_{gm} * L}{\frac{1}{N} + 0.25 * Ct}$$

Ec. 2

Donde b_{gm} es la tasa máxima de producción de biomasa bruta para un IAF ≥ 5 en $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ y se calculó con la ecuación 3.

$$b_{gm} = F * b_o + (1 - F) * b_c$$

Ec. 3

Los valores de bo y bc se calcularon con las ecuaciones de Campos-Aranda (1996).

Donde bo es la tasa de fotosíntesis bruta en días completamente nublados ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) calculada con la ecuación 8 y bc es la tasa fotosíntesis bruta en días completamente despejados ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) calculada con la ecuación 9.

Donde F es igual a la fracción del día cubierta con nubes estimada con la ecuación 4.

$$F = \left(\frac{Ac - 0.5 * Rg}{0.80 * Rg} \right)$$

Ec. 4

Donde Ac es la radiación fotosintéticamente activa en un día totalmente despejado en $\text{cal} \times \text{cm}^{-2} \times \text{d}^{-1}$, valores reportados por la FAO para las diferentes latitudes y para una fotosíntesis máxima de (P_{max}) de $20 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Los valores de Ac para diferentes latitudes se reportan tabulados para cada mes del año, por la FAO (1981). Se asume que la radiación fotosintéticamente activa de un día totalmente cubierto es el 20% de Ac y que la radiación fotosintéticamente activa equivale al 50% de la radiación global total de onda corta Rg , la cual fue reportada para Tabasco por Peralta-Gamas *et al.* (2008).

Sin embargo, como la fotosíntesis máxima P_{max} depende de la temperatura diurna y de la cadena fotosintética de cada especie, es necesario realizar un ajuste a la ecuación (3), como lo indica la FAO (1981), ya que existen cultivos que pueden tener una P_{max} mayor o menor a $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Para realizar el ajuste de bgm , se calculó la temperatura diurna o “fototemperatura” utilizando la ecuación 5, propuesta por Went (1957).

$$T_{foto} = T_{max} \frac{1}{4} (T_{max} - T_{min})$$

Ec. 5

Donde: T_{foto} = fototemperatura, T_{max} = Temperatura máxima, T_{min} = Temperatura mínima.

Con la temperatura media del periodo de desarrollo del cultivo de yuca, se determinó que el cultivo de yuca pertenece al grupo de planta C_3 . Con el valor de T_{foto} y utilizando el modelo de Crespo (2009) se obtuvo el valor de la P_{max} . Como la P_{max} para el cultivo de yuca, en este caso, siempre fue mayor a $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, entonces bgm se calculó con la ecuación 6.

$$bgm = F * bo * \left(\frac{100 + \frac{x}{5}}{100} \right) + (1 - F) * bc \left(\frac{100 + \frac{x}{2}}{100} \right)$$

Ec. 6

Donde x es el incremento o decremento porcentual de la P_{max} con respecto al valor de 20, la cual se calculó con la ecuación 7.

$$x = \left(\frac{P_{max} - 20}{20} \right) * (100)$$

Ec. 7

$$bo = a + b * \text{sen}(x)$$

Ec. 8

Donde la ordenada al origen a y la pendiente b se calculan con las ecuaciones (8a) y (8b) y X es el incremento en grados y se calcula con la ecuación (8c).

$$a = 222.8544 + 0.09404921 * LAT - 0.0260356 * LAT^2$$

Ec. 8a

$$b = 0.03006075 - 2.071174 * LAT - 0.003555859 * LAT^2$$

Ec. 8b

$$x = 99.09568 + 0.98516 * ND$$

Ec. 8c

Donde LAT es igual a la latitud de la localidad y ND es número del día del calendario Juliano a la mitad de cada mes, tanto para el parámetro bo como de bc .

$$bc = a + b * \text{sen}(x)$$

Ec. 9

Donde la ordenada al origen a y la pendiente b se calculan con las ecuaciones (9a) y (9b) y X es el incremento en grado y se calcula con la ecuación (9c).

$$a = 417.5005 + 0.2520018 * LAT - 0.03956738 * LAT^2$$

Ec. 9a

$$b = -1.365752 - 3.1747950 * LAT - 0.01327754 * LAT^2$$

Ec. 9b

$$x = 99.03568 + 0.90516 * ND$$

Ec. 9c

L = Coeficiente de tasa máxima de crecimiento y se calcula con la ecuación 10.

$$L = 0.3424 + 0.9051 * (\log_{10})(IAF) \quad \text{Ec. 10}$$

Donde: IAF es el Índice de Área Foliar. El IAF utilizado en este estudio, fue el reportado por Cock y El-Sharkawy (1988). N = Duración del ciclo del cultivo, para el cual se consideraron 287 días ECOCROP (2007) y C_t = Coeficiente de respiración que utilizan en la ecuación 2. El coeficiente C_t se calcula con la ecuación 11.

$$C_t = C_{30} * (0.044 + 0.00019 * T + 0.0010 * T^2) \quad \text{Ec. 11}$$

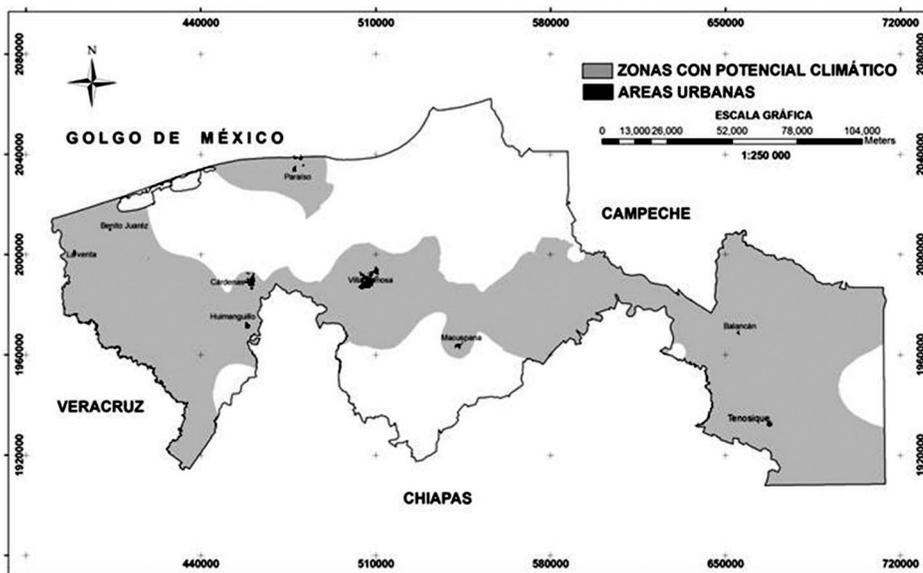
Donde: $C_{30} = 0.0108$ para cultivos como la yuca —que no son leguminosas— y T es igual a la temperatura media en °C. Una vez estimada la biomasa neta de cada mes, se procede a calcular el rendimiento potencial; el cual se conoce al multiplicar la biomasa neta total por el índice de cosecha Hi del cultivo de yuca. El valor de Hi del cultivo de yuca utilizado fue de 0.56, el cual fue reportado por Pinho *et al.* (1995); Peressin *et al.* (1998); El-Sharkawy (2007) y Acosta (1985).

Resultados

Los resultados muestran que, climáticamente, el estado de Tabasco dispone de temperatura y precipitación favorable para el buen desarrollo y crecimiento del cultivo de yuca. Las temperaturas promedios mensuales de 28.5°C máximas y mínimas 21.7°C presentes en el estado no son limitantes, por lo que todo el estado es apto para cultivar yuca. Las temperaturas promedio anual de las 35 estaciones meteorológicas fluctúan entre 25.6 a 28.4°C, las cuales están en el rango de temperatura deseable, de 20 a 29°C.

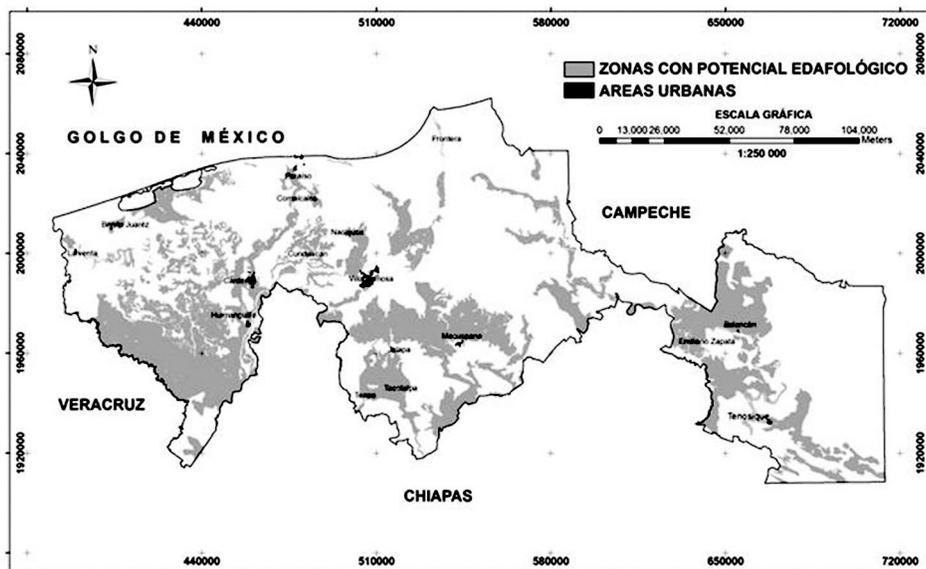
El análisis de la precipitación promedio mensual indica que el estado de Tabasco cuenta con una superficie de 1'659,590 hectáreas con alto potencial productivo para cultivar yuca. Al aplicar la metodología de la FAO (1978), los resultados muestran que el estado de Tabasco presenta un periodo de crecimiento que varía de 240 a 365 días; por lo cual, el cultivo de yuca no presentaría restricciones a su crecimiento y desarrollo. La superficie con alto potencial climático (precipitación y temperatura) para el cultivo de yuca en el estado de Tabasco, es de 1'474,490 hectáreas (figura 2).

Figura 2
Zonas con alto potencial climático para el cultivo de la yuca
en el estado de Tabasco, México.



De las 81 subunidades de suelo reportadas por Palma-López *et al.* (2007), para el estado de Tabasco, sólo 30 de ellas presentan un alto potencial productivo para cultivar yuca que, en conjunto, suman una superficie de 685,403 hectáreas. En la figura 3 se muestra la distribución espacial de las subunidades de suelos en el estado de Tabasco y en el cuadro 3 se enlistan los nombres y la superficie de cada una de las subunidades de suelo con alto potencial edáfico para Tabasco.

Figura 3
Zonas con alto potencial edafológico para producir yuca
en el estado de Tabasco, México.



Cuadro 3
Subunidades de suelo con alto potencial productivo para
cultivar yuca en el estado de Tabasco, México.

<i>Nombres</i>	<i>Claves</i>	<i>Superficie (has)</i>	<i>Nombres</i>	<i>Claves</i>	<i>Superficie (has)</i>
FluvisolÉútrico	FLeu	21,0319.31	AcrisolFérrico	ACfr	60,330.90
FluvisolÉútrico + VertisolCrómico	FLeu+VRcr	2,204.84	AcrisolPlíntico + AlisolFérrico	ACpl+ALfr	3,002.44
CambisolDístrico	CMdy	390.02	AcrisolHáplico	ACha	8,866.30
CambisolCrómico	CMcr	12,122.04	AlisolHúmico + AlisolPlíntico	ALhu+ALpl	2,033.91
LuvisolCrómico	LVcr	154,031.36	AlisolFérrico	ALfr	871.31
LuvisolCrómico+ AcrisolPlíntico	LVcr+ACpl	16,752.42	AlisolHúmico+ AlisolGléyico	ALhu+ALgl	685.71
LuvisolHáplico	LVha	14,594.51	AlisolHúmico	ALhu	1,772.52
LuvisolCrómico + AlisolGléyico	LVcr+ALgl	2,512.73	AlisolFérrico + AlisolHáplico	ALfr+ALha	994.88
AcrisolGléyico	ACg	2,001.65	AlisolHáplico	ALha	404.98
AcrisolPlíntico	ACpl	84,424.46	AlisolFérrico + GleysolMólico	ALfr+GLmo	208.46
AcrisolPlíntico + AcrisolGléyico	ACpl+ACgl	1,813.28	ArenosolHipoluvico	ARlw	15,880.36
AcrisolHúmico + GleysolPlíntico	AChu+GLpl	3,009.06	FerralsolRódico	FRro	9,377.94
AcrisolHúmico	AChu	24,458.27	RegosolDístrico	RGdy	3,776.58
AcrisolHúmico + AcrisolGléyico	AChu+ACgl	4,130.65	PlintosolÚmbrico	PTum	3,036.04
AcrisolHúmico + AcrisolPlíntico	AChu+ACpl	2,247.30	PlintosolÉútrico	PTeu	37,075.20

Al realizar el álgebra de mapas de las áreas con alto potencial climático y edafológico se obtuvo el área con alto potencial edafoclimático (clima y suelo) del estado de Tabasco. Esta área equivale a 476,617 hectáreas que se distribuyen en trece municipios. En la figura 4 se observa la distribución espacial en el estado y en la 5, la superficie con alto potencial productivo por municipio. En donde el 70% de la superficie con alto potencial productivo se concentra en cuatro municipios jerarquizados a continuación: Huianguillo (171,124 has), Balancán (70,386 has) Tenosique (50,348 has) y Macuspana (41,337 has); el 30% se localiza en los nueve municipios restantes. El rendimiento potencial estimado para el cultivo de la yuca en el estado de Tabasco es de 48.3 t ha⁻¹; estos rendimientos fueron estimados para plantaciones con 287 días de edad provenientes de material vegetativo (“estacas”), con una distancia de siembra de 1 x 0.80 m, lo que equivale a obtener una densidad de 12,500 plantas por hectárea.

Figura 4
Zonas con alto potencial edafoclimático para cultivar yuca en el estado de Tabasco, México.

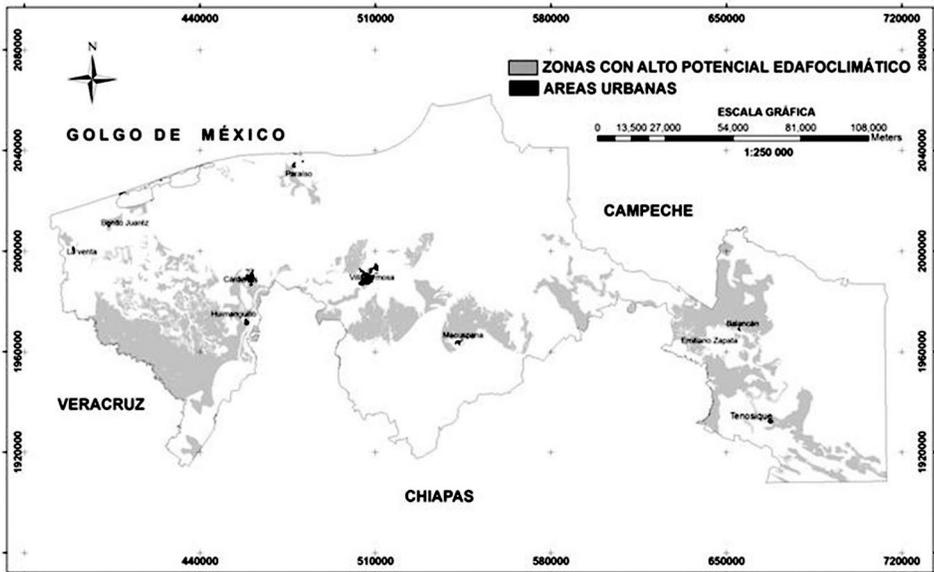
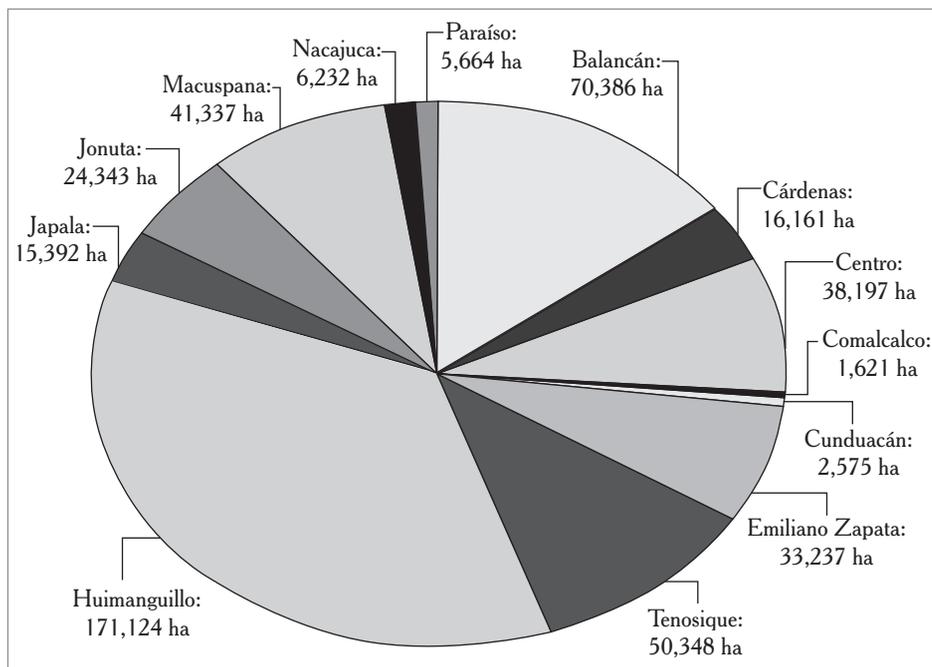


Figura 5
Superficie municipal con alto potencial edafoclimático para cultivar yuca en el estado de Tabasco, México.



Discusión

El-Sharkawy *et al.* (1993) reportan que el rango óptimo de temperatura en la hoja de yuca es de 25 a 35°C; esto, debido a que la tasa de fotosíntesis es mayor, por lo que las temperaturas promedio presentes en el estado de Tabasco no son una limitante para el desarrollo del cultivo de yuca. Las altas precipitaciones que históricamente se presentan en la parte norte del estado de Tabasco (Teapa, Tacotalpa y Jalapa, principalmente) superan los 2,500 mm de lluvia que se consideran como el máximo óptimo para el desarrollo y crecimiento de la yuca. Sin embargo, ECOCROP (2007) menciona como régimen de lluvia absoluto máximo 5,000 mm; este régimen trae consigo la disminución de cosechas e incremento de mano de obra en las labores de cosecha; además, los suelos presentes en la parte norte del estado son de textura arcillosa, la cual retarda la infiltración del agua, perjudicando el buen desarrollo de la raíz.

Las subunidades de suelo del cuadro 3 cumplieron con las propiedades químicas y físicas de suelos que demanda el cultivo de la yuca; éstas, al ser comparadas con las propiedades de suelo que el ECOCROP (2007) menciona como básicas para determinar zonas con alta potencialidad. El resto de la superficie del estado de Tabasco no presen-

ta suelos con alta potencialidad para cultivar yuca. Por ejemplo, las subunidades de los suelos Histosoles (Hs) que abarca una superficie de 90,581.87 has, sólo están libres de manto freático en la superficie de 30 a 40 días, en los cuales el manto freático desciende hasta 50 cm de profundidad, en promedio (Palma-Salgado *et al.*, 2007), lo cual limita el crecimiento de la raíz, ya que el cultivo de la yuca no tolera encharcamientos ni condiciones salinas del suelo (Aristizábal *et al.*, 2007).

La superficie cultivada actual de yuca en Tabasco es de 1,555 hectáreas (SIAP-SAGARPA, 2011), las cuales pueden incrementarse con la habilitación de áreas con alto potencial productivo identificadas en el presente trabajo. Tales zonas corresponden a las variedades MPan-51 y México-59. Las variedades fueron seleccionadas por presentar resistencia a las bacterias *Xanthomonas manihotis*, *Sphaceloma manihoticola* y *Cercospora henningsii*; así como a los insectos *Frankliniella cephalica* y *Caliothrips sp.*, principales plagas del cultivo de yuca (INTA, 1981; Acosta, 1985).

Los rendimientos estimados para el estado de Tabasco con el método de la FAO (1978) superan en 68.08% y 60.40% al rendimiento promedio nacional en la modalidad de temporal y de riego, que son de 13.57 t ha⁻¹, y 16.75 t ha⁻¹, respectivamente. A nivel estatal, el rendimiento promedio de yuca es de 12.44 t ha⁻¹, el cual es superado en un 68.91% con respecto al rendimiento estimado en el presente trabajo. Sin embargo, es importante resaltar que el rendimiento estimado en el presente estudio es teórico, en el cual sólo intervienen dos variables climáticas (la radiación y la temperatura), y una variable biológica (índice de área foliar).

Asimismo, es importante resaltar que este rendimiento se estima en condiciones de control efectivo de las labores culturales del cultivo: control de arvense, plagas y enfermedades, fertilización, distancia de siembra, época de siembra, entre otros. Como las estimaciones de los rendimientos potenciales están en función de la cantidad de radiación que llega a una determinada localidad, éstos varían; por ello, el rendimiento potencial estimado de 48.3 t ha⁻¹ para Tabasco no puede incrementarse, debido a que el cultivo de yuca demanda 16 MJ m⁻² de energía (Hunt *et al.*, 1977) y el estado sólo puede proporcionarle al cultivo 11.12 MJ m⁻² las cuales no satisfacen los requerimientos de energía que el cultivo de yuca de manda. Por ello, aunque en otras regiones del mundo se han reportado rendimientos experimentales de hasta 80 t ha⁻¹ de raíz fresca (Ceballos, 2002), el estado de Tabasco no podría alcanzar dichos rendimientos por el déficit de energía solar que existe. Los rendimientos estimados de yuca corresponden a las variedades MPan-51 y México-59.

Es importante resaltar que estas variedades deben evaluarse en las zonas con alto potencial productivo para conocer el desarrollo productivo y sus rendimientos experimentales, respectivamente, antes de establecer cualquier programa de inversión en esta agrocadena.

Conclusiones

El estado de Tabasco cuenta con 476,617 hectáreas con alto potencial edafoclimático (clima y suelo), que se distribuyen en trece municipios, en donde el 70% de la superficie con alto potencial productivo se concentran en cuatro municipios: Huimanguillo, Balan-

cán, Tenosique y Macuspana. Los rendimientos potenciales esperados en el cultivo de yuca en el estado de Tabasco son de 48.3 t ha⁻¹. La metodología FAO usada en el presente trabajo mostró que el recurso suelo es el factor ambiental que más limita el potencial productivo del cultivo de yuca en el estado de Tabasco.

Literatura citada

- Aceves-Navarro, L. A.; Arrieta-Rivera, A. y Barbosa-Olán, J. L. (2008). *Manual de AGROCLIM 1.0*. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 28 pp.
- Acosta, E. J. (1985). *Informe de la evaluación del programa de yuca. Área Mejoramiento*. CAEHUI/INIA. Huimanguillo, Tabasco. 24pp.
- Alarcón, M. F. y Dufour, D. (1998). *Almidón agro de yuca en Colombia: Tomo I. Producción y Recomendaciones*. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical. Montpellier Francia: Centro de Cooperación Internacional en recherche agronomique pour le développement. Vol. 1. 35 pp.
- Aristizábal, J.; T. Sánchez y Mejía, L. D. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 63. Roma. 129 pp. En: <http://www.fao.org/docrep/010/a1028s/a1028s00.HTM> (consultado el 25 de marzo 2010).
- Barbosa, Í. do S.; Andrade, L. A. y Almeida, J. A. P. (2009). Zoneamiento agroecológico do municipio de Lagoa Seca, PB. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 13(5):623-632.
- Campos-Aranda, D. F. (1996). Programa en BASIC para la estimación del rendimiento climático máximo. *Agrociencia*. 30: 21-30.
- Cadavid, L. F. (2002). Conservación de suelos dedicados al cultivo de la yuca. En: *Cultivo de la yuca en el tercer milenio*. Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización Cali: CIAT. 87pp.
- Ceballos, H. (2002). *La yuca en Colombia y el mundo: Nueva perspectiva para un cultivo milenario*. En: <http://www.clayuca.org/contenido.htm> (Consultado el 15 de febrero de 2010).
- Cock, J. H. y El-Sharkawy, M. A. (1988). Physiological characteristics of cassava (*Manihotesculenta* Crantz) 2. Initial products of 14 CO₂ fixation. *Photosynthesis Research*. 12: 237-241.
- Crespo, P. G. (2009). Sistema para la adaptabilidad de cultivos y estimación de rendimientos potenciales. En: www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/agm/rendi1.doc. (consultado el 28 de octubre de 2011).
- ECOCROP (2007). *The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Versión 1.0. AGLS. Rome, Italy: En: <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home> (consultado el 12 de agosto del 2011).
- El-Sharkawy, M. A.; Tafur, S. M. y Cadavid, L. (1993). *Photosynthesis of cassava and its relation to crop productivity*. First International Scientific Meeting Cassava Biotechnology Network, Cartagena de las Indias, Colombia. 1992. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. p 414-324.
- El-Sharkawy, M. A. (2007). Physiological characteristics of cassava tolerance to prolonged drought in the tropics: Implications for breeding cultivars adapted to seasonally dry and semiarid environments. *Braz. J. Plant Physiol.* 19: 257-286.
- ESRI (2004). *ArcGIS 9. Getting Started With ArcGIS*. Sistema de información. Environmental System Research Institute. Redland, C. A. USA. 265pp.
- FAO (1978). *Report on the agroecological Zones Project. Methodology and Results for Africa*. World Soil Resources Report 40. FAO. Rome, Italy. 127pp.
- FAO (1981). *Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1: Methodology and Results for Africa*. Food and Agriculture Organization of the United Nations World soils report No. 48. Rome, Italia. 158 pp.
- FAO (2008). *Yuca para la seguridad alimentaria y energética*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. En: <http://www.fao.org/newsroom/ES/news/.html> (consultado el 11 noviembre de 2009).
- Fischer, G. J. y Makowski, M. (2000). *AZWIN An Interactive Multiple-criteria Analysis Tool for Land Resources Appraisal*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. International Institute for Applied Systems Analysis. World Soil Resources Reports 87. 91 pp.

- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía. UNAM. Serie Libros, No. 6. México, D. F. 90 pp.
- Guillén, R. D. (1973). Ecological zones with aptitud for *Manihot esculenta* in Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, Maracay. 41-44.
- Hunt, L. A.; Wholey, D. W. y Cock, J. H. (1977). Growth physiology of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Field Crop*. 30: 77-91.
- IMTA (2003). ERIC III. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Extractor Rápido de Información Climatológica v.1.0. CD. 28 pp.
- INIA (1981). "Sabanera" y "Costeña": dos variedades de yuca para el trópico húmedo de México. Folleto Técnico No. 1. CAEHUI/INTA. Huimanguillo, Tabasco. 16pp.
- INEGI (2008). *Anuario Estadístico Tabasco*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Gobierno del estado de Tabasco. México. 597 pp.
- Nozica, G.; Henríquez, M. y Paral, R. (1998). *Sistemas de información geográfica: Una herramienta para el diagnóstico en la planificación regional*. Universidad Nacional de San Juan. Argentina. 46 pp.
- Palma-López, D. J.; Cisneros, D. E.; Moreno, C. E. y Rincón-Ramírez, J. A. (2007). *Suelos de Tabasco: Su uso y manejo sustentable*. Colegio de Postgraduados-ISPOTAB-FRUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 194 pp.
- Peressin, V. A.; Monteiro, D. A.; Lorenzi, J. O.; Durigan, J. C.; Pitelli, R. A y Perecin, D. (1998). Acúmulo de materia seca na presença e na ausencia de olantas infestante no cultivar de mandioca SRT 59-Branca de Santa Catarina. *Bragantia*. 57:135-148.
- Peralta-Gamas, M.; Jiménez-Jiménez, R.; Martínez-Gallardo, J. B.; Rivera-Hernández, B.; Pascual-Córdova, A.; Caraveo-Ricardez, A. C. y Aceves-Navarro, L. A. (2008). *Estimación de la variación espacial y temporal de la radiación solar en el estado de Tabasco, México*. XX Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria. Villahermosa, Tabasco, México. 243 pp.
- Pinho, J. L. N.; Távora, F. J. A.; Melo, F. I. O y Queiroz, G. M. (1995). Yield components and partitioning characteristics of cassava in the coastal area of Ceará. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*. 17: 89-96.
- Ponce, T. y Oña, X. (2009). Perfil de yuca. Centro de información e inteligencia comercial-CICO de CORPEI. En: <http://www.pucesi.edu.ec/pdf/yuca.pdf> (consultado el 27 de octubre de 2011).
- REDIEX (Red de Inversiones y Exportaciones) (2010). Perfiles de productos para la exportación de almidón de mandioca. Asunción, Paraguay. En: www.rediex.gov.py (consultado el 24 de octubre de 2011).
- SIAP-SAGARPA. (2011). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesca-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. En: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx> (consultado el 3 de noviembre de 2009).
- Scott, G. J.; Rosegrant, M. W. y Ringl, C. (2000). *Raíces y tubérculos para el siglo 21. Tendencias, proyecciones y opciones de política*. Instituto Internacional de Investigaciones sobre Políticas Alimentarias. Washington, D. C. U.S.A. 71 pp.
- USAID (Agencia del Gobierno de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional). (2010). *Mandioca, una opción industrial*. Asunción, Paraguay. 54 pp. En: www.paraguayvende.com.py. (consultado el 8 de octubre de 2011).
- Went, F. W. (1957). The experimental control of plant growth. *Chronica Botany*. 17: 257-262.

Recibido: Mayo 6, 2011

Aceptado: Febrero 16, 2012



Título: *Carave*
Técnica: Grafito sobre papel
Autor: Adoración Palma García (2manoS)
Medidas: 18 x 20 cm aprox.
Año: 2011