

Zonificación edafoclimática de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) para la producción sostenible de bioproductos¹

Edaphoclimatic zonig of cassava (*manihot esculenta* crantz) for sustainable production of bioproducts

José Luis Del Rosario Arellano² , Noe Aguilar-Rivera³ ,
Otto Raúl Leyva-Ovalle⁴ , Pablo Andres-Meza⁵ ,
Isaac Meneses-Marquez⁶  y Gloria Ivette Bolio López⁷ 

RESUMEN

El almidón de la yuca es una biomasa con potencial para elaborar una gran cantidad de bioproductos, entre ellos, los bioplásticos, materiales biodegradables que pueden representar una alternativa a la producción de plásticos de origen fósil (334 millones t año⁻¹), productos petroquímicos que han encaminado a una crisis ambiental. Por otro lado, se puede fomentar la sostenibilidad agroindustrial, al cultivar la planta en áreas geográficas óptimas. Se utilizó la metodología de zonificación a través de variables edafoclimáticas, sometidas al SIG ArcMap para determinar áreas potenciales en el estado de Veracruz, México. La prueba Kruskal-Wallis se empleó para validar la zonificación. Se observó un área con aptitud óptima edafoclimática de 1,465,210 ha, con mayor distribución en la provincia fisiográfica Golfo Norte. Kruskal-Wallis demostró que la metodología de zonificación de la FAO, es útil para determinar áreas con potencial edafoclimático. Por último, se encontraron áreas óptimas para cultivar yuca como fuente de almidón con uso futuro en la elaboración de bioproductos.

Palabras clave: Yuca, zonificación edafoclimática, bioproductos, bioplásticos, sostenibilidad.

¹ Al CONACYT por el financiamiento del estudio doctoral; al Dr. David Jesús Palma López, Dr. Lorenzo Alfredo Aceves Navarro, Dr. Emiliano Pérez Portilla y Dr. Benigno Rivera López por el apoyo en el desarrollo de la metodología de zonificación.

² Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (FCBA), región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana. Correo electrónico: jdelrosario@uv.mx

³ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (FCBA), región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana. Correo electrónico: naguilar@uv.mx

⁴ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (FCBA), región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana. Correo electrónico: oleyva@uv.mx

⁵ Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (FcBA), región Orizaba-Córdoba, Universidad Veracruzana. Correo electrónico: pandres@uv.mx

⁶ Campo Experimental Cotaxtla (CECOT), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Correo electrónico: meneses.isaac@inifap.gob.mx

⁷ División Académica de Ingenierías y Ciencias Agropecuarias, Universidad Popular de la Chontalpa (UPCH). Correo electrónico: gloria.bolio@upch.mx

ABSTRACT

Cassava starch is biomass with the potential to produce a large number of bioproducts, including bioplastics, biodegradable materials that can represent an alternative to the production of plastics of fossil origin (334 million t year⁻¹), petrochemical products that have led to an environmental crisis. On the other hand, agro-industrial sustainability can be promoted by growing the plant in optimal geographic areas. The zoning methodology was used through edaphoclimatic variables, submitted to the ArcMap GIS to determine potential areas in the state of Veracruz, Mexico. The Kruskal-Wallis test was used to validate the zoning. An area with an optimal edaphoclimatic aptitude of 1,465,210 ha was observed, with a greater distribution in the North Gulf physiographic province. Kruskal-Wallis demonstrated that the FAO zoning methodology is useful to determine areas with edaphoclimatic potential. Finally, optimal areas were found to grow cassava as a source of starch with future use in the production of bioproducts.

Keywords: Cassava, edaphoclimatic zoning, bioproducts, bioplastics, sustainability.

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una planta con distribución en ambientes tropicales y subtropicales, cultivada por agricultores de bajos ingresos debido a que es rentable aún bajo condiciones adversas edafoclimáticas. No obstante, aunque en promedio se reporta un rendimiento de 12.80 t ha⁻¹ de raíces frescas (FAO, 2014), es posible alcanzar más de 80 t ha⁻¹ bajo condiciones óptimas (Howeler *et al.*, 2014; Saraiva *et al.*, 2019). En la actualidad, la yuca se considera parte fundamental de la soberanía alimentaria para más de 800 millones de personas alrededor del mundo; además, mercados locales y regionales de África-subsahariana, India, Indonesia, Filipinas y América Latina la han enfocado para la alimentación animal (Howeler *et al.*, 2013), y aunque es multipropósito, puesto se consume el follaje como vegetal (Munyahali *et al.*, 2017), la alta extracción de almidón de sus raíces tuberosas (> 30%) (Buddhakulsomsiri *et al.*, 2018; Atwijukire *et al.*, 2019) seguirá siendo el más competitivo, gracias a su potencial para el desarrollo de bioproductos con alto valor agregado, tanto en aplicaciones industriales alimentarias y no alimentarias como: etanol, productos farmacéutico, papel, textiles, edulcorantes, fructosa, alimento pecuario y moléculas funcionales de diversas aplicaciones (Zhang *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017; Santos, *et al.*, 2017; FAO, 2018; Ekop *et al.*, 2019) e inclusive en la manufactura de bioplásticos. Estos últimos debido a que el almidón tiene capacidad de gelificar, moldear, formar recubrimiento, aunado a su alta capacidad de biodegradación (Paunonen, 2013; Andrade *et al.*, 2014; Laycock & Halley, 2014).

De lo anterior, cabe destacar que mundialmente se producen 335 millones de toneladas de plástico (European Bioplastics, 2018), en el cual casi el 30% se utiliza para fabricar productos de un solo uso. Debido, a la ligereza y durabilidad de estos productos, tienen la capacidad de viajar largas distancias hasta culminar en ambientes terrestres, costas y el océano (Zbyszewski & Corcoran, 2011; Di Gregorio, 2012), situación que causa problemas ambientales vertiginosos (Iles & Martin, 2013). Al respecto, los bioplásticos, surgen como una alternativa, ya que son ecocompatibles, utilizan menor energía y baja emisión de subproductos tóxicos para su producción, además de los limitados recursos petroquímicos que promueve el uso de plásticos convencionales (Papong *et al.*, 2014; Oever *et al.*, 2017). Por otro lado, aunque los bioplásticos son elaborados principalmente de almidón proveniente de cultivos como maíz y caña de azúcar (IFBB, 2017; European Bioplastic, 2018), el utilizar un cultivo para uso industrial se debe evitar competir con la producción alimentaria, de lo contrario puede conducir a impactos ambientales y sociales, cambio de uso de suelo y otros relacionados con los objetivos de la agenda 2030 de desarrollo sostenible (Song *et al.*, 2014; Morone *et al.*, 2014).

Por otra parte, para lograr un mayor potencial productivo de forma sostenible, es fundamental planificar el uso de tierras, aspecto que se logra con una zonificación agroecológica (ZAE) (Suárez, 2014; Olivares, 2018; Olivares & Hernández 2019). La ZAE permite hacer un ordenamiento territorial de la superficie de la tierra y clima en unidades más pequeñas, con características similares relacionadas con su aptitud, producción potencial e impacto ambiental, considerando restricciones biofísicas (FAO, 1997; Aguilar-Rivera *et al.*, 2018), en este contexto, el análisis espacial con sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas de utilidad para evaluar, mejorar el procesamiento de datos y visualizar su cartografía (Patel *et al.*, 2000). Con base en la yuca, se han elaborado trabajos de ZAE a gran escala (nivel mundial) para conocer su distribución en tierras marginales, y potencial en la producción de bioetanol (Jiang *et al.*, 2019); así también, para identificar áreas cultivables con menor riesgo por el ataque de plagas y enfermedades (Herrera *et al.*, 2011). Ahora bien, la metodología ZAE se ha aplicado como base para el desarrollo de proyectos nacionales, estatales o regionales. De lo anterior, se llevó a cabo la determinación de zonas potenciales en México para 55 cultivos de importancia económica, como herramienta en la planeación nacional y estatal de siembras e implementación de programas de desarrollo agrícola (Díaz *et al.*, 2012); mientras en el estado de Tabasco, se realizó un estudio de zonificación en yuca por medio de la metodología propuesta por la FAO, como material de apoyo en la formación de políticas de desarrollo rural, mismo que reportó una superficie con aptitud óptima edafoclimática de 476,617 ha (Rivera-Hernández *et al.*, 2012). Otro trabajo de ZAE en Tabasco, logró determinar 833,181 ha cultivables con *Jatropha curcas* L, con miras en la producción de biocombustibles (González *et al.*, 2015).

En la actualidad, en México la yuca presenta un rendimiento promedio nacional de 12.58 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2019), con el estado de Veracruz como cuarto productor (SIAP, 2019), lugar del Neotrópico que se piensa, pueden existir zonas con potencial edafoclimático, al indicarse que gran parte de la zona costera del Golfo en el Océano Atlántico presenta condiciones adecuadas para el cultivo (Howeler, *et al.*, 1984; Herrera *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2019). Dado que el almidón puede representar una materia prima potencial para la elaboración de bioproductos, entre estos, los bioplásticos, la cual, en conjunto con la aprobación de iniciativas de ley relacionadas con la prohibición del uso de bolsas plásticas y productos homólogos de origen fósil (Gaceta Oficial del Estado, 2018; Milenio Digital, 2019), se abre pauta al desarrollo e investigación en biopolímeros. El objetivo del presente trabajo fue identificar zonas óptimas edafoclimáticas en el estado de Veracruz, a través de un análisis espacial, con base en la metodología FAO y la validación del modelo mediante el análisis de varianza no paramétrico Kruskal-Wallis. Las áreas predichas pueden ser de utilidad para lograr una producción sostenible de bioproductos.

Metodología

Área de Estudio

El estado de Veracruz cuenta con una superficie de 72,815 km² (7,281,500 hectáreas) dividido en 212 municipios. Se localiza al este de la República mexicana y sur del Trópico de Cáncer, entre los paralelos 17°08'13" al 22°28'18" de latitud norte y los meridianos 93°36'29" al 98°40'54" de longitud oeste. Colinda al norte con Tamaulipas; al este con el Golfo de México, Tabasco y Chiapas; al sur con Chiapas y Oaxaca; al oeste con Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí. En cuanto a las

condiciones climáticas, presenta una precipitación media anual de 1,500 mm, temperatura media anual entre 22 a 26°C, con predominio de climas cálido subhúmedo con lluvias en verano A(w) (54.14%) y cálido húmedo con abundantes lluvias en verano Am (26.42%) (Soto, 1989; INEGI, 2017). Un gradiente altitudinal desde los 0 hasta > 5,000 msnm, cuya mayor altitud se relaciona con el volcán Pico de Orizaba (5,610 msnm) y Cofre de Perote 4,200 msnm (Benítez & Welsh, 2010; Soto & Geissert 2011; INEGI, 2017); además, el estado abarca siete de las 15 diferentes provincias fisiográficas de México (Medina *et al.*, 2010), cada una con su respectivas subprovincias (Figura N°1).

Descripción general

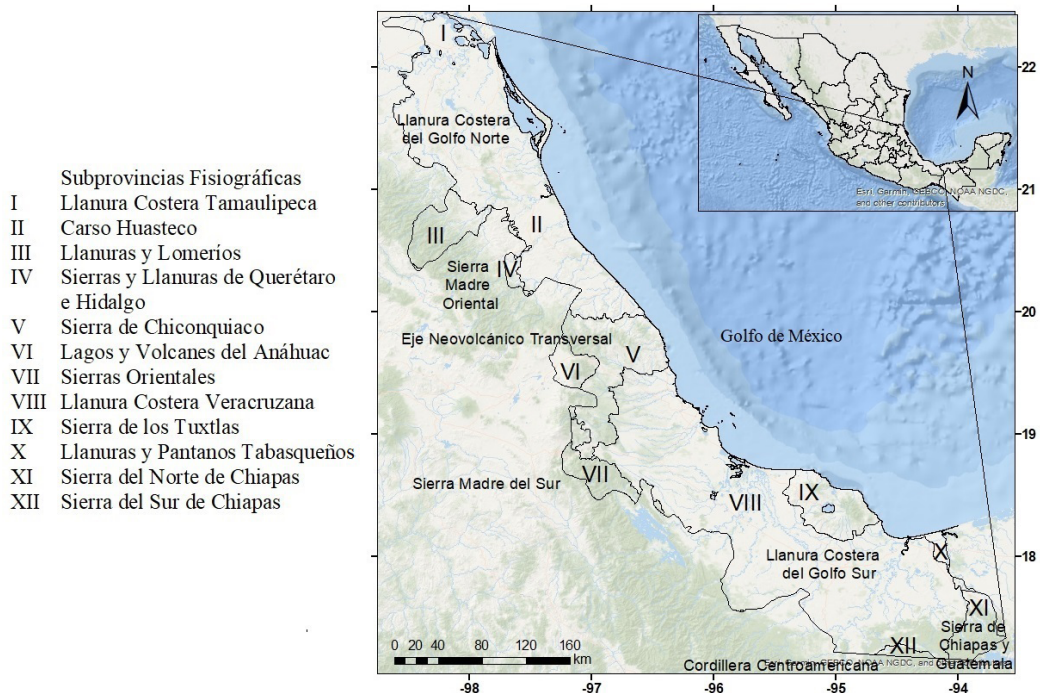
Se tomó como referencia la metodología de Zonificación Agroecológica (ZAE) propuesto por la FAO (FAO, 1981), para ubicar zonas con aptitud óptima para el cultivo de yuca en Veracruz, acorde con el clima actual y bajo una agricultura de secano, y modificaciones con base a la información disponible de acuerdo a de Oliveira Aparecido *et al.* (2020).

Selección de requerimientos agroecológicos del cultivo de yuca

Los requerimientos agroecológicos de la yuca se determinaron a través del estudio de los valores óptimos de clima y suelo reportados en la literatura, por considerarse factores que guardan relación directa con la producción agrícola (FAO, 1997; Polthanee, 2018) (Cuadro N°1).

Figura N°1.

Ubicación geográfica del estado de Veracruz en la República mexicana, conjunto con la división de las Provincias Fisiográficas.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°1.

Requerimientos edafoclimáticos de la yuca para definir zonas con alto potencial productivo en el estado de Veracruz, México.

Clima				
Aptitud	Marginal Mínima	Óptima	Adecuada	Marginal máxima
Temperatura (°C)	< 10	20 a 29	29 a 35	> 35
Precipitación (mm)	< 500	1000 a 2500	2500 a 5000	> 5000
Periodo de crecimiento (días)	-	240 – 365	-	-
Edáfico Aptitud óptima				
pH	5.5 a 8			
Profundidad	50 a 150 cm			
Textura	Media, ligera			
Fertilidad	Alta			
Drenaje	Bueno			
Pedregosidad	Baja			
Salinidad	< 4dS/m			

Fuente: Howeler *et al.*, (1984); Howeler *et al.*, (2013); Howeler *et al.*, (2014); ECO-CROP, (2014); Buddhakulsomsiri *et al.*, (2018).

Manejo de datos climáticos

Para realizar la zonificación climática se consultaron bases de datos diarios de temperatura, precipitación y evaporación de 322 estaciones meteorológicas reportadas en Veracruz (CONAGUA, 2017). Los datos se analizaron de manera visual, posterior se seleccionaron y descargaron respecto a la serie histórica (1981-2015) y ubicación geográfica de la estación meteorológica en el estado. Los datos faltantes de temperatura se calcularon por regresión lineal, considerando un coeficiente de determinación superior a 0.70 (Johnson, 2000); mientras para precipitación y evaporación se estimó el promedio ponderado de al menos cuatro estaciones cercanas (Aceves *et al.*, 2018). De las estaciones meteorológicas selectas (Anexo N° 1), se elaboró el análisis climático.

Por otra parte, la productividad agroclimática de la tierra depende del número de días del año en que el régimen de temperatura y humedad favorecen el desarrollo y crecimiento del cultivo, periodo determinado por el periodo de crecimiento (PC) y su duración (DPC) (FAO, 1997; Fisher *et al.*, 2012). En cada estación meteorológica selecta, se calculó la DPC mediante la fórmula propuesta por Selyaninov, (1930) (Ec. 1, 2), la cual indica la fecha exacta de inicio (K_i , coincidente con el inicio del periodo de lluvias, y cuando la precipitación es mayor a la $ET_o/2$) y fin (K_f , cuando la precipitación no sufre la demanda de la evapotranspiración) del periodo de crecimiento (PC). Para ello, se emplearon datos mensuales de precipitación y la mitad de la evapotranspiración de referencia ($ET_o/2$) para calcular los coeficientes k mensuales. ET_o se estimó a partir de la evaporación multiplicada por el factor 0.8 (García, 1979).

$$(Ec. 1) \quad K_i = \left[\frac{(1 - kb)}{(ka - kb)} \right] * Db + 15$$

$$(Ec. 2) \quad K_f = \left[\frac{(1 - kb)}{(ka - kb)} \right] * Db + 15$$

Donde:

K_i = Inicio del periodo de crecimiento

K_f = Fin del periodo de crecimiento

ka = mes de inicio del periodo de lluvias

ka = mes de fin del periodo de lluvias

kb = mes de inicio del periodo seco

kb = mes de fin del periodo seco

Db = día base del mes con inicio del periodo seco

Db = día base del mes con fin del periodo seco

Para obtener las fechas (temporalidad), al concluir los cálculos de ambas ecuaciones, se sumó 1 al mes kb (Ec.1), y al número total de días del mes kb se restó K_f . En los casos de un periodo húmedo (la precipitación es mayor a la ETo), al final del periodo de lluvias se contabilizó el tiempo para evapotranspirar 100 mm de agua almacenada en el perfil de suelo (FAO, 1981, Fisher *et al.*, 2012). Posteriormente, los datos se reanalizaron, al restar los días con temperatura media $< 10^\circ\text{C}$ para establecer un PC libre de heladas (FAO, 1997).

Manejo de datos edáficos

Con base al recurso suelo, se realizó un acopio de las propiedades morfológicas, físicas y químicas de los perfiles reconstruidos de cada grupo de suelo presente en el estado de Veracruz (Cuadro N° 1), los cuales se encuentran clasificados por el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 2016); asimismo, se recabaron sus respectivos archivos en formato shape tomados de la serie II Continuo Nacional escala 1: 250,000 (INEGI, 2014).

Cartografía y álgebra de mapas

Para el análisis espacial, se utilizó el SIG ArcMap versión 10.3.1 (ESRI, 2015). Las variables climáticas de cada estación meteorológica se almacenaron y sometieron a interpolación espacial por el método Kriging, ya que el algoritmo se relaciona con el término de Mejor Predictor Lineal Insegado (MPLI) y debido a que reduce la varianza del error en la predicción (Castro *et al.*, 2010). Posteriormente, al aplicarles un álgebra de mapas, se logró identificar las zonas con alto potencial climático. Por otro lado, las propiedades de cada grupo de suelo se compararon con las necesidades edáficas del cultivo (Cuadro N° 1), aquellos suelos que suplieron los requerimientos de la yuca, se catalogaron como zonas con alto potencial edafológico. En este estudio, la distribución de área urbana (119,482 ha) y áreas naturales protegidas (235,202 ha) fueron seleccionados como inadecuados en la predicción de zonas potenciales para la siembra de yuca (CONABIO, 2012; INEGI, 2013). Finalmente se realizó el álgebra de mapas de las zonas con alto potencial climático y edáfico, dando origen al mapa de aptitud edafoclimática.

Análisis estadístico del modelo

La validación del modelo de zonificación se obtuvo por un análisis de varianza no paramétrico de comparación de rangos denominado Kruskal-Wallis (Ec. 3) (Kruskal & Wallis, 1952), el cual se basó en el conteo de presencias de colectas de yuca en las zonas con alto y bajo potencial. Se considera que, una mayor presencia estadística de colectas en las áreas potenciales sugiere la validez de la zonificación. Pues bien, se consultaron 40 datos de colectas de yuca georreferenciadas en el estado de Veracruz (Meneses *et al.*, 2014), mismas que se superpusieron sobre cada mapa generado. En seguida, se efectuó un conteo para determinar la cantidad presencias en las

zonas con alto y bajo potencial, tomando cada mapa de representación de las variables como repeticiones de la zona. El análisis se realizó a un nivel de confianza $p < 0.05$, con ayuda del software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2018).

$$\text{Ec. 3. } H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^c \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Donde:

$N = \sum n_i$, número total de observaciones.

n_i = número de observaciones en la i -ésima muestra independiente.

C = número de tratamientos o poblaciones.

R_i = suma de los rangos en la i -ésima muestra.

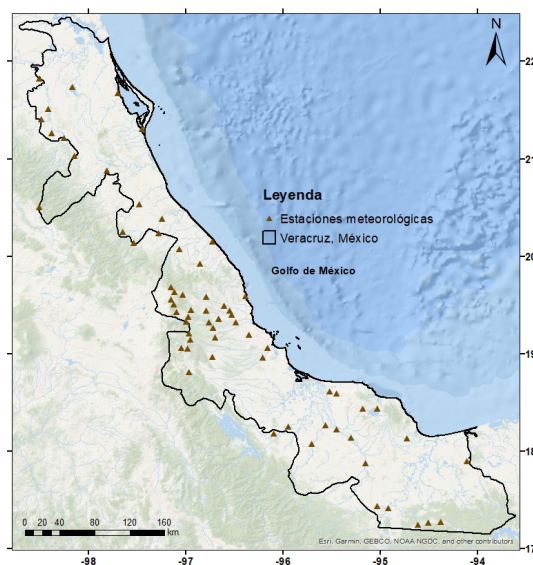
Resultados y discusión

Estaciones climatológicas utilizadas

En total, 67 estaciones climatológicas se seleccionaron, cuidando obtener la mayor homogeneidad de distribución geográfica en el estado (Figura N°2), así también por una mínima cantidad de datos faltantes y longitud de la serie histórica, es decir, con registros de no menos de 12 años; toda vez que, es posible trabajar con series de hasta 10 años en estudios de zonificación agroecológica (Pérez-Portilla & Geissert-Kientz, 2006), puesto que, disponer de una menor cantidad de información supondría menor representatividad y a consecuencia, propiciar sesgo en la determinación de las zonas óptimas. El análisis climático de las estaciones selectas mostró que la temperatura promedio anual fluctuó entre 8.95 a 25.80°C, con una precipitación de 593.59 a 4,021.34 mm, una DPC entre 101 a 365 días, lo que infiere, que el estado tiene zonas agroclimáticas aptas para cultivar la yuca.

Figura N°2.

Distribución geográfica de 67 estaciones climatológicas selectas en el estado Veracruz México



Fuente: Elaboración propia.

La temperatura media, se considera la variable de mayor importancia meteorológica que afecta el desarrollo del cultivo (Streck, 2002; Moreto et al., 2018). De lo anterior, el rango de aptitud óptima 20 a 29°C se distribuyó en 6,257,382 ha, principalmente en la planicie veracruzana, cual representó un 85.93% del territorio. Un déficit térmico < 20°C se observó en las zonas montañosas de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, Sierra Madre Oriental y Sierra Madre del Sur (Figura N°3), al respecto, es frecuente observar una relación inversa entre altitud y temperatura media anual (Krasilnikov et al., 2013; Krömer et al., 2013; Suarez et al., 2015).

La disponibilidad de agua es un factor crítico para lograr la sostenibilidad en la agricultura de secano (Zamora-Salgado et al., 2011; González-Robaina et al., 2018; Orlando et al., 2018), de ahí la importancia de su consideración. Dentro de este contexto, el análisis de precipitación anual (Figura N°4), mostró un área óptima de 5,809,957 ha, cual representa el 81.33% del territorio veracruzano. No obstante, la variable restringió parte de la provincia de la Sierra Madre Oriental y la subprovincia de la Sierra de Chiconquiaco, en específico, en los municipios de Actopan, Alto Lucero, Emiliano Zapata, Úrsulo Galván y Puente Nacional al presentar precipitaciones <1,000 mm. De lo anterior, aunque *M. esculenta* puede desarrollarse en estas áreas con déficit de agua (Howeler et al., 2013; Santos et al., 2019), la productividad puede verse afectada si se compara su establecimiento en zonas con una mayor disponibilidad hídrica (Howeler et al., 2013). Por otra parte, aunque en el sureste del estado se observó una aptitud adecuada con 2,500 a 5,000 mm, en concreto, en los municipios de Las Choapas, Minatitlán e Hidalgotitlán (Figura N°4); precipitaciones que fueron similares al norte del estado de Tabasco (Rivera-Hernández et al. 2012), su cultivo bajo esta condición fomentaría la competencia con malezas, así también, si no se controlan de manera oportuna, pudieran funcionar como hospederos de insectos plaga de importancia económica (Biffe et al., 2010; Dje et al., 2017; Polthanee, 2018).

Figura N°3.

Temperatura óptima para el cultivo de *M. esculenta* Crantz, en Veracruz México.

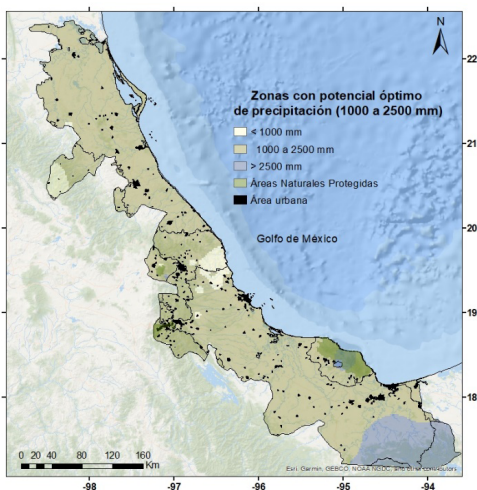
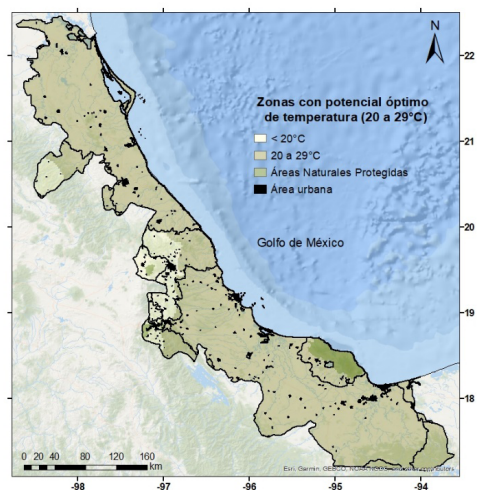


Figura N°4.

Precipitación óptima para el cultivo de *M. esculenta* Crantz, en Veracruz México.



Fuente: Elaboracion propia.

Con base a la DPC, esta presentó una cobertura óptima del 92.03% (Figura N°5), mientras las zonas no aptas con periodos < 240 días se explican en dos escenarios: a) lugares en que la precipitación no suplió la demanda de $ET_0/2$, situación característica de la zona centro, en los municipios de Paso del Macho, porciones de Cotaxtla, Jamapa, Tlaxixcoyan, Soledad de Doblado y Medellín; y 2) el ajuste de la DPC con la temperatura $\leq 10^\circ\text{C}$ para obtener zonas libres de heladas (FAO, 1997), coincidente a su vez con la temperatura marginal extrema mínima para la yuca. Este último escenario fue característico de los alrededores del Parque Nacional Pico de Orizaba, Cofre de Perote y porción noroeste del estado. Pues bien, el déficit de humedad se puede superar mediante prácticas de irrigación (Odubanzo *et al.*, 2011; Fischer *et al.*, 2012; Pipatsitee *et al.*, 2019), uso de clones tolerantes a la sequía (Granados & Medina 2012; Matos *et al.*, 2016; Visses *et al.*, 2018) o con menor ciclo de desarrollo (Guira *et al.*, 2017; Olivares, 2018), con el fin de evitar en lo posible que algunas fases fenológicas sean expuestas a eventos extremos y se reduzca su producción (Medina *et al.*, 2012; Polthane, 2018; Olivares & Hernández, 2019).

Con el álgebra de mapas se consiguió la identificación zonas con alto potencial climático (Figura N°6), el cual definió 5,271,612 ha óptimas para el cultivo (72.76% del territorio). Las variables se comportan como factores limitantes de distribución en rededores del Cofre de Perote y Pico de Orizaba correspondiente a la parte oeste de la zona centro del estado; así mismo en la zona noroeste en la Sierra de Huayacocotla, lugares con clima templado (12 a 18°C), semifrío (5 a 12°C) y frío o muy frío (<2 a 5°C) (Soto, 1989); la Reserva de la Biosfera de los Tuxtlas (RBT), y región sureste. Al respecto, aunque en la RBT muestra condiciones óptimas de temperatura, presenta una precipitación pluvial superior al óptimo, y es que, el clima de esta región está influenciado por su gradiente altitudinal, topografía y cercanía al mar Golfo de México (Soto, 2004), con precipitaciones entre 3,000 a 7,000 mm en barlovento y 1,500 a 3,500 en sotavento (Gutiérrez-García y Ricker, 2001; Soto, 2004).

Figura N°5.

Periodo de crecimiento para el cultivo de *M. esculenta* Crantz, en Veracruz México.

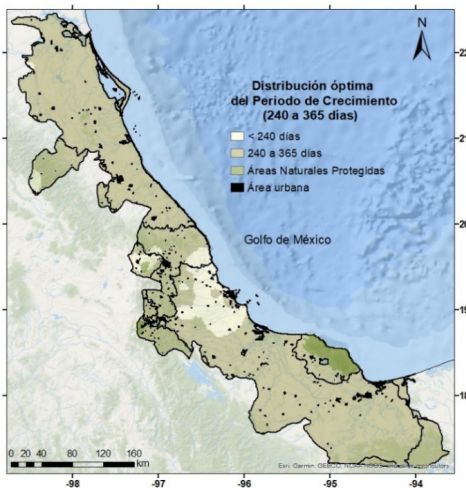
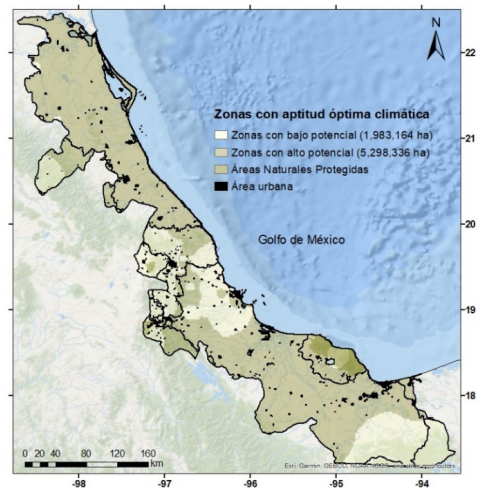


Figura N°6.

Zonas con aptitud óptima climática para el cultivo de *M. esculenta* Crantz, en Veracruz México.



Fuente: Elaboración propia.

El estado de Veracruz presenta diversidad de suelos, debido principalmente a las diferencias de altitud entre llanuras y serranías, que van desde 0 hasta > 5,000 msnm, la variabilidad de rocas con características y orígenes distintos, además su interacción con el agua, el clima y la biota (Medina *et al.*, 2010; Campos, 2011). Como resultado, el estado presenta 14 grupos de suelos dominantes, donde solo los phaeozem, regosol, arenosol, andosol y luvisol presentaron alto potencial para cultivar *M. esculenta*, mismos que representan el 48.42% de territorio veracruzano (Figura N°7). Así, el suelo se comporta como el factor de mayor restricción para yuca. La evaluación agroecológica del recurso suelo trae consigo un uso racional, mediante el conocimiento de su aptitud para producir de forma sostenible cualquier cultivo o variedad agrícola (Polovinkina & Rozov, 2017). Si bien, la yuca se puede producir en suelos ácidos con baja fertilidad (Howeler, 2002; Temegne *et al.*, 2016), el uso de fertilizantes u otras enmiendas mejoran el rendimiento del cultivo (Howeler *et al.*, 2014; Santillano *et al.*, 2019). Sin embargo, se puede reducir la aplicación de estos insumos hasta un 25%, bajo un suelo con aptitud óptima, y hasta en un 33% al usar abonos verdes y micorrizas (Joao *et al.*, 2017), cualidad que desde el punto de vista agronómico se refleja en la disminución de costos de producción además de menor impacto ambiental.

Con el álgebra de mapas para zonas con alto potencial climático y edáfico, se construyó el mapa con aptitud óptima edafoclimática (Figura N°8), el cual detectó un área de 1,465,211 ha (20.12% del territorio), con distribución en todo el estado, primordialmente en zonas con clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004; INEGI, 2017). Lo anterior concuerda con la presencia de diversidad genética en gran parte de la zona costera del Golfo (SINAREFI, 2013). Por otra parte, el área predicha supera las 476,617 ha potenciales identificadas para Tabasco (Rivera-Hernández *et al.*, 2012), estado considerado primer productor a nivel nacional. El área predicha se localizó en dos zonas agroecológicas aptas: 1) la provincia fisiográfica del Golfo Norte, un área con agricultura de secano de significativa contribución al sector agrícola del país, que debido al clima favorable se pueden obtener altos rendimientos con baja inversión de insumos agrícolas (Krasilnikov *et al.*, 2013). La idoneidad de la zona se corroboró por la importancia cultural del tubérculo por parte de los grupos indígenas huastecos en la región norte (Meléndez & Hirose, 2018) y por reportes de producción históricos del cultivo en los municipios de Tantoyuca, Martínez de la Torre e Ixcatepec con 22.36, 1.0 y 2.5 hectáreas cultivadas respectivamente (SIAP, 2019) y 2) la provincia fisiográfica de la llanura costera del Golfo Sur, considerado uno de los lugares más cálidos (24 a 26°C) y húmedos de México (Krasilnikov *et al.*, 2013). En esta zona, destacan los municipios de José Azueta, Isla, Juan Rodríguez Clara, San Juan Evangelista y alrededores de la Reserva de la Biosfera de los Tuxtlas. Lo anterior concuerda con un trabajo sobre la identificación de áreas potencial de yuca a nivel nacional, donde la región de Isla, presentó suelos ácidos, arenosos y precipitación de 1,400 mm, características óptimas para la producción de yuca (Howeler *et al.*, 1984); por otra parte, y en menor proporción en la zona centro del estado en los municipios de Carrillo Puerto, norte de Tierra Blanca, La Antigua, Veracruz, porciones de Cotaxtla, Ixtaczoquitlán, y tierras bajas de Zongolica y Mixtla de Altamirano. Lo anterior contrasta con resultados de distribución real de la yuca en la parte centro y sur del estado (Meneses *et al.*, 2014). Por todo lo anterior, la zonificación agroecológica de cultivos es una primera fase para potencializar productividad y rentabilidad, sin embargo, solo cuando se usan variedades eficientes (Amamgbo *et al.*, 2016), y manejo del cultivo como control eficiente de malezas, plagas y enfermedades etc, es posible maximizar los rendimientos (Howeler *et al.*, 2014; Visses *et al.*, 2018) y con ello asegurar la sostenibilidad de la producción, con miras en la elaboración de bioproductos de alto valor agregado.

Figura N°7.

Zonas con aptitud óptima edafológica para el cultivo de *M. esculenta* Crantz, en Veracruz México.

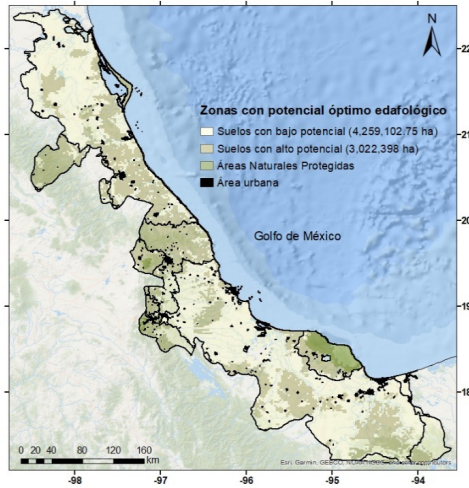
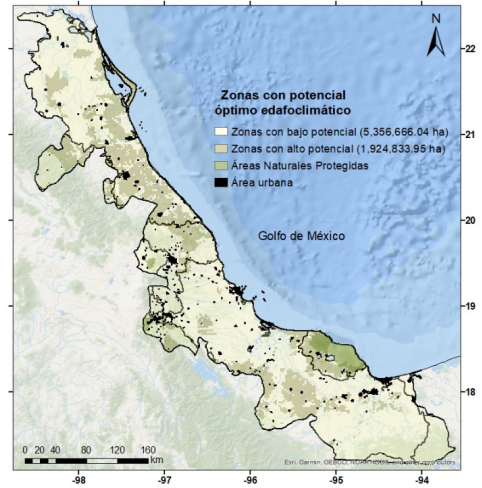


Figura N°8.

Zonas con aptitud óptima edafoclimática para el cultivo de *M. esculenta* Crantz, en Veracruz México.



Fuente: Elaboración propia.

Validación

El análisis de varianza no paramétrico Kruskal-Wallis, se llevó a cabo a través del conteo de presencias de la especie en las zonas potenciales y no potenciales (Cuadro N°2). Al someter los datos al test de Kruskal-Wallis, se encontró una diferencia altamente significativa respecto a la presencia de colectas encontradas respecto las zonas ($p < 0.01$). Se observó la presencia de 28.67 colectas en las zonas catalogadas con aptitud óptima potencial, superior a las 11.33 encontradas en zonas no aptas (Cuadro N°3). Al respecto, es evidente que los agricultores forman parte de la distribución de la especie, que aunado a la adaptación de la yuca a condiciones adversas de clima y suelo (Diallo *et al.*, 2016; Xue *et al.*, 2016), son factores que propician se establezca en zonas cuyas condiciones edafoclimáticas son restringidas. La validación no paramétrica Kruskal-Wallis demostró la factibilidad de proponer la metodología FAO para determinar áreas aptas óptimas para producir yuca; no obstante, se considera que la validación física es necesaria, antes de proponer algún modelo predictivo.

Cuadro N°2.

Conteo de presencias de 40 colectas en zonas potenciales y no potenciales para el cultivo de yuca en el estado de Veracruz, México

Zona	Presencia
Temperatura	Áreas óptimas 40
Precipitación	Áreas óptimas 36
Periodo de crecimiento	Áreas óptimas 23
Climático	Áreas óptimas 29
Edáfico	Áreas óptimas 26

Zona		Presencia
Edafoclimático	Áreas óptimas	18
Temperatura	Áreas no óptimas	0
Precipitación	Áreas no óptimas	4
Periodo de crecimiento	Áreas no óptimas	17
Climático	Áreas no óptimas	11
Edáfico	Áreas no óptimas	14
Edafoclimático	Áreas no óptimas	22

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°3 .

Análisis de medias en zonas aptas y no aptas para el cultivo de yuca en el estado de Veracruz, México

Zonas	Colectas
Zona óptima	28.67 a
Zona no óptima	11.33 b

Fuente: Elaboración propia. Letras distintas en la columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Conclusiones

El estado de Veracruz presentó potencial climático (temperatura media 20 a 29°C, precipitación 1,000 a 2,500 mm y duración del periodo de crecimiento 240 a 360 días) en 5,271,612 ha consideradas óptimas (72.39% del territorio), mientras de los 14 grupos de suelos dominantes, solo los phaeozem, regosol, arenosol, andosol y luvisol presentan alto potencial para cultivar *M. esculenta*, mismos que representan el 48.42% de territorio veracruzano; así el recurso suelo se comporta como factor de mayor restricción para el cultivo. Por otro lado, en las zonas donde la precipitación no supe la demanda de $ET_0/2$, se puede superar el déficit de humedad mediante prácticas de irrigación, uso de clones tolerantes a la sequía o con menor ciclo de desarrollo para evitar en lo posible que algunas fases fenológicas sean expuestas a eventos extremos y se reduzca su producción. Así también, la restricción del factor suelo permiten el uso de fertilizantes minerales u otras enmiendas como abonos verdes, compostas y micorrizas para aumentar su potencial productivo. El álgebra de mapas con aptitud óptima edafoclimática detectó un área de 1,465,211 ha, es decir, el 20.12% del territorio para futuro establecimiento del cultivo de yuca, y uso promisorio para el desarrollo de bioplásticos, entre otros bioproductos de alto valor agregado. El área predicha se caracteriza principalmente por un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano A(w), con mayor proporción espacial en la provincia fisiográfica del Golfo Norte. Por último, es posible validar la metodología de zonificación de la FAO por la prueba Kruskal-Wallis a través de datos de presencia real de la especie, propuesto en esta investigación.

Referencias

ACEVES, L., RIVERA, B., LÓPEZ, A., PALMA, D., GONZÁLEZ, R. & JUÁREZ, J. Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) al cambio climático en el

estado de Tabasco, México. Nova Scientia, 2018, Vol. 10, N°1, p. 369-396. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-07052018000100369&script=sci_arttext

AGUILAR-RIVERA, N., ALGARA-SILLER, M., OLVERA-VARGAS, L. & MICHEL-CUELLO, C. Land management in Mexican sugarcane crop fields. Land Use Policy, 2018, Vol. 78, p. 763-780. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.034>

AMAMGBO, E., AKINPELU, O., OMODAMIRO, R., NWAKOR, N. & EKEDO, O. Promotion and popularization of some elite cassava varieties in Igbariam Anambra state: Implication for food security and empowerment. Global Advanced Research Journal of Agricultural Science, 2016. Vol. 5, N°2, p. 61-66. <http://garj.org/garjas/2/2016/5/2/promotion-and-popularization-of-some-elite-cassava-varieties-in-igbariam-anambra-state-implication-for-food-security-and-empowerment>

ANDRADE, J., ACOSTA, D., BUCHELI, M. & OSORIO, O. Desarrollo de un recubrimiento comestible compuesto para la conservación del tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* S.). Información tecnológica, 2014. Vol. 25, N°6, p. 57-66. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000600008>

ATWIJUKIRE, E., HAWUMBA, J., BAGUMA, Y., WEMBABAZI, E., ESUMA, W., KAWUKI, R. & NUWAMAN-YA, E. Starch quality traits of improved provitamin a cassava (*Manihot esculenta* Crantz). Heliyon, 2019, Vol. 5, N°2, p. e01215. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01215>

BENÍTEZ, G. & WELSH, C. Patrimonio natural de Veracruz. En: FLORESCANO, E. y ORTÍZ, J (eds.). Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz. Universidad Veracruzana. Gobierno del Estado de Veracruz, 2010, p. 79.

BIFFE, D., CONSTANTIN, J., OLIVEIRA, R., FRANCHINI, L., RIOS, F., BLAINSKI, E., ARANTES, J., ALONSO, D. & CAVALIERI, S. Período de interferência de plantas daninhas em mandioca (*Manihot esculenta*) no noroeste do Paraná. Planta Daninha, 2010, Vol. 28, N°3, p. 471-478. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582010000300003>

BUDDHAKULSOMSIRI, J., PARTHANADEE, P. & PANNAKONG, W. Prediction models of starch content in fresh cassava roots for a tapioca starch manufacturer in Thailand. Computers and Electronics in Agriculture, 2018. Vol. 154, p. 296-303. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.016>

CAMPOS, A. Distribución y caracterización del suelo. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (ed.). La biodiversidad en Veracruz: estudio de estado. Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C. México, 2011, Vol. 1, p. 69-97.

CASTRO, F., PEZZOPANE, J., CECÍLIO, R., PEZZOPANE, J. & XAVIER, A. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2010. Vol. 14, N°8, p. 871-880. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800012>

CONABIO (COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD). Áreas Naturales Protegidas Federales de México, agosto 2012. México, DF. 2012. (Consulta: 10/10/2018).

http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/anp_agosto12gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). Información climatológica por estado. 2017. (Consulta: 10/11/2018). <https://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=ver>

DE OLIVEIRA L., DA SILVA, J., DE MENESES, K., LORENÇONE, P., LORENÇONE, J., DE OLANDA G. & BOTEGA, G. Agricultural zoning as tool for expansion of cassava in climate change scenarios. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, Vol. 142, N°3, p. 1085-1095. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03367-1>

DIALLO, M., WOOD, S., DIALLO, A., MAHATMA-SALEH, M., NDIAYE, O., KOULY, A., NGAMB, T., GUISE, M., SECK, S., DIOP, A. & GUISE, A. Soil suitability for the production of rice, groundnut, and cassava in the peri-urban Niayes zone, Senegal. *Soil & Tillage Research*, 2016, Vol. 155, p. 412-420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.09.009>

DIAZ, G., GUAJARDO, R., MEDINA, G., SÁNCHEZ, I., SORIA, J., VÁZQUEZ, J., QUIJANO, J., LEGORRETA, F. y RUIZ, A. Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. 1ª ed, México, DF, 2012, p. 139.

DI GREGORIO, B. Tracking plastic in the ocean. *Earth*, 2012, p. 28-35. (Consulta: 13/07/2018). <https://www.earthmagazine.org/article/tracking-plastic-oceans>

DI RIENZO, A., CASANOVES, F., BALZARINI, M., GONZÁLEZ, L., TABLADA, M. & ROBLEDO, C. InfoStat, versión 2018. Programa de cómputo. 2018, Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar/>

DJE, I., KOUASSI, K., KOFFI, K., KOUAKOU, K., BAUDOINS, J. & ZORO, B. Evaluation of cassava varieties for weed tolerance ability. *Experimental Agriculture*, 2017. Vol. 54, N°3, p. 443-451. DOI 10.1017/S0014479717000151

ECOCROP (BASE DE DATOS DE REQUERIMIENTOS ECOLOGICOS DE CULTIVOS). Data sheet. 2014. (Consulta: 28/09/2017). <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/dataSheet?id=1420>

EKOP, E., SIMONYAN, J. & EVWIERHOMA, T. Utilization of cassava wastes for value added products: An overview. *International Journal of Scientific Engineering and Science*, 2019, Vol. 3, N°1, p. 31-39. <https://zenodo.org/record/2556466#.Yk-8WCjMK1s>

ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10.3.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. 2015.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Bioplastics market data. 2018. (Consulta: 22/07/2018). <https://www.european-bioplastics.org/market/>

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). Zonificación agroecológica. Guía general, boletín N°73, Roma, Italia, 1997.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). 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, N°48, Rome, Italia, 1981, p. 158.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). Food Outlook. Biannual Report on Global Food Markets, 2014. (Consulta: 03/12/2017). <https://www.fao.org/documents/card/en/c/fd8798f5-8706-4845-823b-d7b9da9dd181/>

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). Food Outlook- Biannual Report on Global Food Markets-November, Roma, Italia, 2018. (Consulta: 12/12/2018). <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CA2320EN/>

FAOSTAT. Data production crops. Statistics Division Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia, 2019. (Consulta: 03/10/2019). <http://www.fao.org/faostat/en/#data>

FISCHER, G., NACHTERGAELE, F.O., PRIELER, S., TEIXEIRA, E., TÓTH, G., VELTHUIZEN, H.V., VERELST, L. & WIBERG, D. Global Agro-ecological Zones (GAEZ): Model Documentation. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2012, p. 196.

GACETA OFICIAL DEL ESTADO DE VERACRUZ. Ley de prevención y gestión integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial para el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. 2018. (Consulta: 03/04/2019). <http://www.veracruz.gob.mx/gobiernover/gaceta-oficial/>

GARCÍA, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004, N°5, p. 98.

GARCÍA, J. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Tesis doctoral, 1979, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, p. 401.

GONZÁLEZ, R., JUÁREZ, J., ACEVES, L., RIVERA, B. & GUERRERO, A. Zonificación edafoclimática para el cultivo de *Jatropha curcas* L., en Tabasco, México. Investigaciones Geográficas, 2015, N°86, p. 25-37. [dx.doi.org/10.14350/rig.39936](https://doi.org/10.14350/rig.39936)

GONZÁLEZ-ROBAINA, F., DELGADO-ACOSTA, R., DÍAZ-PÉREZ, Y., HERRERA-PUEBLA, J., LÓPEZ-SEIJAS, T. & CID-LAZO, G. Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo. Revista Ingeniería Agrícola, 2018. Vol. 8, N°1, p. 3-12. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/845/959>

GRANADOS, R. & MEDINA, M. de la P. Los indicadores climáticos en la planeación agrícola. En: GRANADOS, R. & TRUJILLO, T. (eds.). Centro- Occidente de México variación climática e impactos en la producción agrícola, 2012, UNAM, Instituto de Geografía, México, México, p. 63-76.

GUIRA, F., SOME, K., KABORE, D., SAWADOGO-LINGANI, H., TRAORE, Y. & SAVADOGO, A. Origins, production, and utilization of cassava in Burkina Faso, a contribution of a neglected crop

to household food security. *Food Science and Nutrition*, 2017. Vol. 5, N°3, p. 415-423. <https://doi.org/10.1002/fsn3.408>

GUTIÉRREZ-GARCÍA, G. & RICKER, M. Climate and climate change in the region of Los Tuxtlas (Veracruz, Mexico): A statistical analysis. *Atmósfera*, 2011, Vol. 24, p. 347-373. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/27738>

HERRERA, B., HYMAN, G. & BELLOTTI, A. Threats to cassava production: known and potential geographic distribution of four key biotic constraints. *Food Security*, 2011. Vol. 3, N°3, p. 329-345. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0141-4>

HOWELER, R. Agronomic practices for sustainable cassava production in Asia. En: HOWELER, R. (ed.). *Cassava research and development in Asia: Exploring new opportunities for an ancient crop. Proceedings of the Seventh Regional Workshop hold in Bangkok, Thailand, October 28-November 1, 2002*, p. 288-314. <https://core.ac.uk/download/pdf/132666903.pdf>

HOWELER, R. Sustainable soil and crop management of cassava in Asia: a reference manual. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2014, p. 280. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/51590>

HOWELER, R., JANSSEN, W. & CONTRERAS, J. Informe del viaje efectuado a diferentes partes de la República mexicana con el objeto de determinar áreas potenciales para la siembra, procesamiento y utilización de la yuca (*Manihot esculenta crantz*), 1984, p. 77. <https://documents.ec/document/informe-del-viaje-efectuado-a-diferentes-partes-de-ciat-informe-del-viaje-efectuado.html>

HOWELER, R., LUTALADIO, N. & THOMAS, G. Save and grow: cassava, a guide to sustainable production intensification; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2013. <https://reliefweb.int/report/world/save-and-grow-cassava-guide-sustainable-production-intensification>

IFBB (INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOMPOSITES). Biopolymers facts and statistics. Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2017. DOI 10.1002/adfm.200600816

ILES, A. & MARTIN, A. Expanding bioplastics production: Sustainable business innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, 2013. Vol. 45, p. 38-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.008>

INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). Marco geoestadístico versión 6.0 (Inventario Nacional de Viviendas 2012), Aguascalientes, Ags., México, 2013. (Consulta: 22/07/2019). <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292829>

INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional), escala: 1:250000, Aguascalientes, Ags., México, 2014. (Consulta: 07/05/2018). http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/eda250s2gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2017, México, 2017, p. 1-25. (Consulta: 29/07/2019). <http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2018/04/AEGEV-2017.pdf>.

JIANG, D., WANG, Q., DING, F. & HAO, M. Potential marginal land resources of cassava worldwide: A data-driven analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, Vol. 104, p. 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.024>

JOAO, J., RIVERA-ESPINOSA, R., MARTÍN-ALONSO, G., RIERA-NELSON, M. & SIMÓ-GONZÁLEZ, J. Sistema integral de nutrición con HMA, abonos verdes y fertilizantes minerales en *Manihot esculenta* Crantz. *Cultivos Tropicales*, 2017, Vol. 38, N°3, p. 117-128. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362017000300017&script=sci_arttext&lng=pt

JOHNSON, D.E. 2000. Métodos multivariados aplicados al análisis de datos. Kansas State University, International Thomson Editores, p. 36- 46.

KRASILNIKOV, P., GUTIÉRREZ-CASTORENA, M., AHRENS, R.J., CRUZ- GAISTARDO, C., SEDOV, S. & SOLLEIRO-REBOLLEDO, E. The soils of Mexico. En: HARTEMINK, A. (ed.). *World Soils Book Series*, 2013, p. 180. <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-94-007-5660-1.pdf>

KRÖMER, T., ACEBEY, A., KLUGE, J. & KESSLER, M. Effects of altitude and climate in determining elevational plant species richness patterns: A case study from Los Tuxtlas, Mexico. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2013, Vol. 208, N°3, p. 197-210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flora.2013.03.003>

KRUSKAL, W. & WALLIS, W. *Journal of the American Statistical Association*, 1952. Vol. 47, N°260, p. 583-621. DOI 10.1080/01621459.1952.10483441

LAYCOCK, B. & HALLEY, P. Starch applications: State of market and new trends. En: HALLEY, P. J. & AVÉROUS, L. (eds.). *Starch Polymers, From Genetic Engineering to Green Applications*. Elsevier B.V, p. 381-419. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53730-0.00026-9>

LI, S., CUI, Y., ZHOU, Y., LUO, Z., LIU, J. & ZHAO, M. The industrial applications of cassava: current status, opportunities and prospects. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, Vol. 97, N°8, p. 2282-2290. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8287>

MATOS, F., FELICIO, R., DA SILVA, M., DE SOUZA, A., CARNEIRO, J., GUIMARÃES, R., SANTOS, F. & SILVEIRA, P. Produtividade de cultivares de mandioca sob déficit hídrico. *Agri-Environment Sciences*, 2016, Vol. 2, p. 15-24. <https://revista.unitins.br/index.php/agri-environmental-sciences/article/view/186>

MEDINA, A., SALAZAR, T. & ÁLVAREZ, J. Fisiografía y suelos. En: FLORESCANO, E. y ORTÍZ, J. (eds.). *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz*. Universidad Veracruzana. Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, 2010, p. 79.

MEDINA, M., GRANADOS, R. & CORTINA, F. Variabilidad del periodo de crecimiento. En: GRANADOS, R. & REYNA, T. (eds.). Centro- Occidente de México: variación climática e impactos en la producción agrícola, México, 2012, p. 95-114.

MELÉNDEZ, L. & HIROSE, J. Patrones culinarios asociados al camote (*Ipomoea batatas*) y la yuca (*Manihot esculenta*) entre los mayas yucatecos, ch'oles y huastecos. Estudios de cultura Maya LII, 2018, p. 193-226. <https://doi.org/10.19130/iifl.ecm.2018.52.941>

MENESES, I., VÁZQUEZ, A., ROSAS, X., & BECERRA, E. Colecta y conservación *ex situ* de germoplasma de yuca en el estado de Veracruz. En: MARTINEZ, J. (ed.). XXVI Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Tabasco 2014 y III Simposio Internacional en Producción Agroalimentaria Tropical, 6 y 7 de noviembre, Villahermosa, Tabasco, México, 2014, p. 391-396.

MILENIO DIGITAL. Los estados en los que están prohibidos los plásticos de un solo uso, ciudad de México, 2019. (Consulta: 12/10/2019). <https://www.milenio.com/estados/que-estados-ya-aprobaron-prohibir-los-popotes-y-bolsas-de-plastico>

MORETO, V., APARECIDO, L., ROLIM, G. & MORAES, J. Agrometeorological models for estimating sweet cassava yield. Pesquisa Agropecuária Tropical, 2018, Vol. 48, N°1, p. 43-51. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4850451>

MORONE, P., TARTIU, V. & FALCONE, P. Assessing the potential of biowaste for bioplastics production through social network analysis. Journal of Cleaner Production, 2014, Vol. 90, p. 43-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.069>

MUNYAHALI, W., PYPERS, P., SWENNEN, R., WALANGULULU, J., VANLAUWE, B. & MERCKK, R. Responses of cassava growth and yield to leaf harvesting frequency and NPK fertilizer in South Kiv, Democratic Republic of Congo. Field Crops Research, 2017, Vol. 214, p. 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.09.018>

ODUBANJO, O., OLUFAYO, A. & OGUNTUNDE, P. Water use, growth, and yield of drip irrigated cassava in a humid tropical environment. Soil and Water Research, 2011. Vol. 6, N°1, p. 10-20. <https://doi.org/10.17221/45/2009-SWR>

OEVER VAN DEN, M., MOLENVELD, K., ZEEVAN VAN DER, M. & BOS, H. Bio-based and biodegradable plastics: facts and figures. 2017. DOI10.18174/408350

OLIVARES, B. Condiciones tropicales de la lluvia estacional en la agricultura de secano de Carabobo, Venezuela. Revista de Ciencias de la Vida, 2018, Vol. 27, N°1, p. 86-102. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.07>

OLIVARES, B. & HERNÁNDEZ, R. Sectorización ecoterritorial para la producción agrícola sostenible del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Carabobo, Venezuela. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 2019, Vol. 20, N°2, p. 323-338. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1462

ORTÍZ, C. Elementos de Agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República mexicana. 3ª ed. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, México 1987, 327 p.

PÁJARO, D. y ORTÍZ, C., Estimación del periodo de crecimiento por disponibilidad de agua y libre de heladas para la república mexicana, 1992. (Consulta: 12/05/2019). https://www.researchgate.net/publication/296696925_Estimacion_del_periodo_de_crecimiento_por_disponibilidad_de_agua_y_libre_de_heladas_para_la_Republica_Mexicana

PAPONG, S., MALAKUL, P., TRUNGKAVASHIRAKUN, R., WENUNUN, P., CHOM-IN, T., NITHITANAKUL, M. & SAROBOL, E. Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2014, Vol. 65, p. 539-550. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.030>

PATEL, R., MANDAL, K. & PANDE, M. Agro-ecological zoning System- A remote sensing and GIS perspective. *Journal of Agrometeorology*, 2000, Vol. 2, N° 1, p. 1-13. https://www.researchgate.net/profile/Patel_R/publication/270683979_Agroecological_Zoning_System_A_Remote_Sensing_and_GIS_Perspective/links/5886fa3aa6fdcc6b791945a2/Agroecological-Zoning-System-A-Remote-Sensing-and-GIS-Perspective.pdf

PAUNONEN, S. Strength and barrier enhancements of cellophane and cellulose derivative films: A review. *BioResources*, 2013, Vol. 8, N°2, p. 3098-3121. <https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/3308>

PÉREZ-PORTILLA, E. & GEISSERT-KIENTZ, D. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: El caso café (*Coffea arabica* L.)-Palma camedor (*Chamaedorea elegans* mart.). *Interciencia*, 2006, Vol. 31, N° 8, p. 556-562.

PIPATSITEE, P., EIUMNOH, A., PRASEARTKUL, P., PONGANAN, N., TAOTA, K., KONGPUGDEE, S., SAKULLEERUNGROJ, K. & CHA-UM, S. Non-destructive leaf area estimation model for overall growth performances in relation to yield attributes of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) under water deficit conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2019, Vol. 47, N° 3. <https://doi.org/10.15835/nbha47311487>

POLOVINKINA, V. & ROZOV, Y. Agroecological evaluation of soils as a basis for controlling soil-ecological risks (by example of soils of the dry steppe zone in the Volgograd region). *Moscow University Soil Science Bulletin*, 2017, Vol. 72, N°1, p. 42-49. <https://doi.org/10.3103/S0147687417010057>

POLTHANEE, A. Cassava as an insurance crop in a changing climate: The changing role and potential applications of cassava for smallholder farmers in Northeastern Thailand. *Forest and Society*, 2018, Vol. 2, p. 121-137. <http://dx.doi.org/10.24259/fs.v2i2.4275>

RIVERA-HERNÁNDEZ, B., ACEVES-NAVARRO, L., JUÁREZ-LÓPEZ, J., PALMA-LÓPEZ, D., GONZÁLEZ-MANCILLAS, R. & GONZÁLEZ-JIMÉNEZ, V. Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 2012, Vol. 16, N°1, p. 29-47. <https://www.redalyc.org/pdf/837/83723442003.pdf>

SANTILLANO, J., ROQUE, L., NÚÑEZ, F., GRIJALVA, R., ROBLES, F., MACÍAS, R., ESCOBOSA, I. & CÁRDENAS, V. La fertilidad del suelo afecta el crecimiento, nutrición y rendimiento de algodón cultivado en dos sistemas de riego y diferentes dosis de nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 2019, Vol. 37, N°1, p.7-14. <https://doi.org/10.28940/tl.v37i1.304>

SANTOS, A., LÓPEZ, Y., ARAÚGO, R., COHIM, E. & ANDRADE, E. Waste bio-refineries for the cassava starch industry: New trends and review of alternatives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 73, p. 1265-1275. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.007>

SANTOS, J., NARVÁEZ, L., SALCEDO, S., ACEVEDO, A., MERCADO, L. & SALCEDO, J. Fisiología del cultivo de yuca en el bosque seco tropical de Sucre-Colombia. *Temas agrarios*, 2019, Vol. 24, N°1, p. 17-26. <https://doi.org/10.21897/issn.2389-9182>

SARAIVA, L., DA SILVA, C. & DA SILVA SANTOS, V. Effect of harvesting times on agronomic characteristics of industrial cassava genotypes. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 2019, Vol. 14, N°2, p. 1-6. DOI 10.5039/agraria.v14i2a5647

SELYANINOV, T. Method of determination of agricultura characteristics. *Trans on Agriculture Meteorology*, 1930, Vol. 21 (en ruso).

SIAP (SISTEMA DE INFORMACION AGRICOLA Y PECUARIA). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. (Consulta: 12/08/2019). <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SINAREFI (SISTEMA NACIONAL DE RECURSOS FITOGENÉTICOS). Manejo, evaluación y acciones que promueven la conservación de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en México. *Resina, Macro Red Impulso*, 2013, p. 30.

SONG, X., CHEN, Y., XU, Y., & WANG, C. Study on tough blends of polylactide and acrylic impact modifier. *BioResources*, 2014, Vol. 9, N°2, p. 1939-1952. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wpcontent/uploads/2016/06/BioRes_09_2_1939_Song_CXW_Study_Tough_Blends_Polylactide_Acrylic_4872.pdf

SOTO, M. Atlas climático del Estado de Veracruz. Instituto de Ecología, Xalapa Ver., 1989, Vol. 25, p. 125.

SOTO, M. El clima. En: GUEVARA, S., LABORDE, J. & SÁNCHEZ-RÍOS, G. (eds.). Los Tuxtlas. El paisaje de la sierra, Xalapa: Instituto de Ecología, A.C., 2004, p. 195-198.

SOTO, M. & GEISSERT, K. Geografía. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (ed.). La biodiversidad en Veracruz: estudio de estado. Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C. México, 2011, Vol. 1, p. 31-97.

STRECK, A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo* L.). *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 2002, Vol. 10, N°1, p. 105-111. <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/3959.pdf>

SUÁREZ, G. Revisión bibliográfica apuntes sobre la zonificación agroecológica de los cultivos. Particularidades en Cuba. Cultivos Tropicales, 2014, Vol. 35, N°4, p. 36-44.

SUÁREZ, G., SOTO, F., GAREA, E. & SOLANO, O. Caracterización agroclimática del macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa, en función de la zonificación agroecológica para el cacao (*Theobroma cacao* L.). Cultivos Tropicales, 2015, Vol. 36, N°1, p. 23-28. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000100003

TEMEGNE, C., MOUAFOR, I. & NGOME, F. Agro-morphological characterization of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) collected in the humid forest and Guinea savannah agro-ecological zones of Cameroon. Greener Journal of Agricultural Sciences, 2016, Vol. 6, N°7, p. 209-225. <http://doi.org/10.15580/GJAS.2016.8.062716107>

VISSES DE ARAÚJO, F. & SENTELHAS, C. & PEREIRA, A. Yield gap of cassava crop as a measure of food security- an example for the main Brazilian producing regions. Food Security, 2018, Vol. 10, p. 1191-1202. <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0831-2>

WRB (BASE REFERENCIAL MUNDIAL DEL RECURSO SUELO). Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106, FAO, Roma, 2016.

XUE, S., LEWANDOWSKI, I., WANG, X. & YI, Z. Assessment of the production potentials of *Miscanthus* on marginal land in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, Vol. 54, p. 932-943. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.040>

ZAMORA-SALGADO, S., RUIZ-ESPINOZA, F.H., BELTRÁN-MORALES, F.A., FENECH-LARIOS, L., MURILLO-AMADOR, B., LOYA-RAMÍREZ, J. & TROYO-DIÉGUEZ, E. Régimen hídrico del maíz en una zona árida, determinando en porcentajes de evaporación. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 2011, Vol. 13, p. 181-186. http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/2748/1396%20zamora_s.PDF?sequence=1&isAllowed=y

ZBYSZEWSKI, M. & CORCORAN, L. Distribution and degradation of fresh water plastic particles along the beaches of Lake Huron, Canada. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, Vol. 220, p. 365-372. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0760-6>

ZHANG, M., XIE, L., YIN, Z., KHANAL, S.K. & ZHOU, Q. Biorefinery approach for cassava-based industrial wastes: current status and opportunities. Bioresource Technology, 2016, Vol. 215, p. 50-62. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.026>

Anexo N°1.

Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas selectas para la zonificación agroclimática de yuca.

Municipio	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Acajete	La Joya	19.611	-97.027	2175
Actopan	Actopan	19.500	-96.600	250
	La Mancha	19.450	-96.544	146
	El Diamante	19.596	-96.384	20
	Los Ídolos	19.408	-96.526	100
Álamo Temapache	Sombrerete	20.889	-97.810	48
Ángel R. Cavada	Ángel R. Cavada	18.597	-95.447	28
Catemaco	Coyame	18.438	-95.026	342
Chalma	Los Hules	21.218	-98.248	75
Chicontepepec	Terrerillos	21.038	-98.141	138
Coatepec	Coatepec	19.456	-96.944	1188
Comapa	El Coyol	19.172	-96.696	545
Cosamaloapan de Carpio	Ciudad Alemán	18.188	-96.094	35
	Paraíso Novillero	18.258	-95.942	8
Cosautlan de Carvajal	Cosautlán	19.333	-96.994	1274
Coscomatepec	Coscomatepec	19.066	-97.041	1530
Coyutla	Coyutla (CFE)	20.256	-97.644	132
Emiliano Zapata	El Carrizal	19.363	-96.658	242
	Emiliano Zapata	19.362	-96.657	924
	Rancho Viejo	19.447	-96.784	914
Fortín	Naranjo	18.814	-96.962	697
Huatusco	Centro Regional Huatusco	19.147	-96.950	1186
Huayacocotla	Palo Bendito	20.509	-98.504	2266
Hueyapan de Ocampo	Cuatotolopan	18.144	-95.296	20
Isla	Garro	18.271	-95.557	20
	La Ceibilla	18.230	-95.445	10
Ixhuatlán del Café	Ixhuatlán del Café	19.055	-96.976	1350
Jalcomulco	Jalcomulco	19.330	-96.762	335
	Santa María Tetetla	19.273	-96.713	282
Jesús Carranza	Jesús Carranza	17.437	-95.030	33
	Las Perlas	17.417	-94.914	22
José Azueta	Azueta	18.075	-95.700	21
Las Choapas	Tancochapa	17.904	-94.105	13
Las Minas	Las Minas	19.690	-97.148	1415
Las Vigas de Ramírez	Las Vigas	19.639	-97.110	2426
Lerdo de Tejada	Naranjal	18.617	-95.516	10
Martínez de la Torre	Martínez de la Torre	20.079	-97.064	89
Mecayapan	Minzapan	18.136	-94.727	48
Medellín	El Copital	18.967	-96.205	14
	El Tejar	19.067	-96.158	10
Misantla	Libertad	19.932	-96.848	59

Municipio	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Naolinco	Almolonga	19.588	-96.784	730
Nautla	El Raudal	20.156	-96.721	10
Ozuluama de Mascareñas	La Laja	21.682	-97.694	5
Panuco	El Olivo	21.832	-98.504	23
	Presas Paso de Piedras Chicayan	21.743	-98.161	40
Papantla	El Remolino	20.388	-97.243	119
	Joloapan	20.238	-97.279	47
Paso de Ovejas	Puente Jula	19.196	-96.344	63
Paso del Macho	Mata Anona	18.972	-96.726	214
Perote	Los Pescados	19.561	-97.148	2395
Platón Sánchez	Platón Sánchez	21.272	-98.373	57
Poza Rica de Hidalgo	Poza Rica	20.541	-97.473	50
Puente Nacional	Puente Nacional	19.325	-96.482	87
San Andrés Tuxtla	Sihuapan	18.439	-95.178	264
San Juan Evangelista	San Juan Evangelista	17.883	-95.146	18
Tamiahua	Tamiahua	21.315	-97.444	5
Tempoal	Cardón	21.414	-98.483	101
	Tempoal de Sánchez	21.519	-98.410	34
Teocelo	Teocelo	19.386	-96.974	1188
Totutla	Totutla	19.213	-96.964	1446
Uxpanapa	Cedillo	17.250	-94.613	68
	La Laguna	17.272	-94.506	83
	Río Grande	17.276	-94.374	72
Xico	Oxtlapa	19.432	-97.092	2111
	Tembladeras	19.512	-97.118	3102
Zozocolco	Tecuntepec	20.141	-97.535	322

Fuente: Elaboración propia.

