

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**División de Ingeniería**

**Departamento de Ciencias del Suelo**



**“Caracterización del cultivo de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) y cartografía de su potencial productivo para producir bioetanol en Veracruz”**

**Por:**

**ALMA NURIA LÓPEZ LÓPEZ**

**TESIS**

**Presentada como requisito parcial para obtener título de:**

**INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Agosto de 2012**

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"  
DIVISION DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO


CARACTERIZACION DEL CULTIVO DE YUCA (*Manihot esculenta Crantz*) Y  
CARTOGRAFIA DE SU POTENCIAL PRODUCTIVO PARA PRODUCIR  
BIOETANOL EN EL ESTADO DE VERACRUZ

TESIS POR:

ALMA NURIA LÓPEZ LÓPEZ

Que se somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito para  
obtener el título:

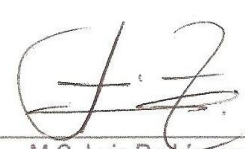
INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

  
Dr. J. Jesús Rodríguez Sahagún  
Presidente del jurado

  
M.C. J. Manuel Cepeda Dovala  
Sinodal

  
M.C. Alejandra R. Escobar Sánchez  
Sinodal

  
Dr. Jesús Uresti Gil  
Sinodal

  
M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez  
Coordinador de la División de Ingeniería

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"



Coordinación de  
Ingeniería

## DEDICATORIA

Especialmente para aquel que me dio la vida, **Dios** el creador de los cielos y de la tierra. Levantarte y contemplar la luz de un nuevo día es una bendición muy especial, que pocas veces agradecemos. En muchas ocasiones al hombre se le olvida que todo depende de Dios, y ha utilizado sus habilidades e inteligencia para destruir este mundo maravilloso que Dios nos dio. Para cuidar y conservar lo que nos rodea es necesario de una sana sabiduría, conocimiento e inteligencia para prosperar en paz y armonía, esta solo se logra confiando plenamente en DIOS.

A los seres más bellos que DIOS me dio mi madre Romelia López R. y mi padre Rosalio López R. los seres que más amo y admiro en la vida, te agradezco madre por tu valentía y amor, a mi padre por su sencillez, humildad y paciencia, gracias a los dos porque lo que yo he logrado es resultado del fruto de su trabajo. A mis hermanos Cándido, Joel, Aníbal, Cristina, Nectali, Sonia, Juanita y Emma son una parte muy importante en mi vida, gracias por el apoyo incondicional soy tan afortunada por tener una familia tan maravillosa, las alegrías y los más bellos recuerdos son gracias a mis sobrinitos que cada día hacen que mi familia siga creciendo, al gordo Sebastián, Lunita, Kikin, Jordi, Jaimito, Alejandra, Ariadna, Nineth, al bebe, Pamela, Hamilton, Keny, Danielito, Emerson (cacho), Denilson, Franklin, Eduandri, Maury, Edelmi, Ceci, Aní, Nahúm y Nilda. Los amo "**FAMILIA LÓPEZ LÓPEZ**", a mis cuñados Yola, Celfa, Flor, Gil, Pepe, Leila, Ramón y Alex.

Dios puso en mi camino al ser más maravilloso y único en el mundo, mi esposo José Gumeta, especialmente para ti amor. Tu comprensión, compañía y amor son un gran impulso para que siga adelante, sobre todo porque existe un motivo muy especial, nuestro bebe el más bello regalo de Dios.

**A una mujer muy linda y bondadosa mi abuelita Jacinta Rodas Reyes, con especial cariño.**

**Tengo en mi memoria grandes recuerdos con mis compañeros y le agradezco a Dios porque me permitió compartir esta parte tan importante de mi vida, que no los cambiaría por nada, especialmente a mi mejor amiga Araceli, chaparra gracias por estar a mi lado en todo momento.**

**A mí querida profe Ale, que siempre me brindo su amistad y cariño.**

**Existen tantos nombres que quisiera mencionar, y tal vez nunca terminaría de escribir, solo me atrevo a dedicar este logro tan importante a ustedes que siempre me brindaron palabras de aliento y animo.**

**Aunque me hiciste pasar por muchos problemas y por amargas angustias tú restaurarás mi vida nuevamente y volverás a levantarme**

**(Paráfrasis salmo 71:20).**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO” mis más sinceros agradecimientos por darme la oportunidad de culminar mi mas anhelado sueño, obtener una bella profesión como lo es la agronomía. Al agradecer ala NARRO estoy incluyendo a sus profesores y la infraestructura por cobijarme durante estos 5 años.**

**A mis asesores:**

**Dr. J. de Jesús Rodríguez S.: a pesar de los problemas que se nos presentaron su apoyo y su confianza siempre estuvieron presentes, gracias.**

**M.C. J. Manuel Cepeda D.: Por su confianza, apoyo y sus palabras de ánimo para terminar este trabajo. Mil gracias**

**M.C. Alejandra R. Escobar S.: por impulsarme en todo momento y sobre todo su apoyo incondicional y amistad, gracias.**

**M.C. H. Daniel Inurreta Aguirre, por su apoyo, paciencia y cooperación. Mil gracias**

**Agradecimientos especiales al Dr. Jesús Uresti Gil y al Ing. Roberto de Jesús López Escudero por todo su apoyo brindado y cooperación en la elaboración de este trabajo y durante mi estancia en el INIFAP.**

# ÍNDICE DE CONTENIDO

Pág.

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE CUADROS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRAC.....	XI

## 1. INTRODUCCIÓN..... 1

1.1. Objetivos..... 2

1.1.1. Objetivos generales..... 2

1.1.2. Objetivos específicos..... 2

1.2. Hipótesis..... 3

1.2.1. Hipótesis general..... 3

1.2.2. Hipótesis específica..... 3

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA..... 4

2.1. Biocombustibles..... 4

2.1.1. Características generales de los biocombustibles..... 4

2.1.2. Bioetanol de primera generación..... 4

2.1.3. Bioetanol de segunda generación..... 5

2.1.4. Estadísticas de producción de biocombustibles..... 6

2.1.5. Rentabilidad de los biocombustibles..... 8

2.2. Factores que promueven la producción de los biocombustibles..... 8

2.2.1. El petróleo y la seguridad energética..... 9

2.2.2. Cambio climático y calentamiento global..... 10

2.2.3. Desarrollo rural..... 10

2.2.4. Seguridad alimentaria..... 11

2.2.5. Políticas para impulsar el desarrollo de los biocombustibles.....	12
2.3. El cultivo de yuca en Veracruz.....	13
2.3.1. Superficie cultivada de yuca.....	13
2.3.2. Paquete tecnológico del cultivo.....	15
2.3.3. Zonificación agroecológica.....	17
2.4. El modelo SWAT.....	18
2.4.1. El modelo SWAT y la extensión ArcSWAT.....	18
2.4.2. Trabajos de cálculo de potencial usando SWAT.....	19
2.5. Sistemas de información geográfica.....	19
2.5.1. Generalidades.....	19
2.5.2. ArcMap.....	20
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
3.1. Área de trabajo.....	21
3.1.1. Ubicación geográfica del estado de Veracruz.....	22
3.1.2. Clima.....	23
3.1.3. Topografía.....	24
3.1.4. Suelo.....	25
3.1.5. Uso del suelo.....	26
3.1.6. Relación del clima, pendiente, tipo y uso del suelo.....	27
3.2. Requerimientos del modelo SWAT.....	28
3.2.1. Generalidades.....	28
3.2.2. Mapas.....	28
3.2.3. Bases de datos y catálogos.....	29
3.2.3.1. Base de datos edafológicos.....	29
3.2.3.2. Parámetros fisiológicos del cultivo de yuca.....	30
3.2.3.3. Estaciones y datos climáticos.....	31
3.2.3.4. Practicas de manejo.....	32
3.2.3.5. Catálogos.....	33
3.3. Procedimientos de simulación.....	34
3.3.1. Generalidades.....	34
3.3.2. Delimitación de cuencas y sub- cuencas.....	34
3.3.3. Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH).....	34
3.3.4. Asignación de parámetros climáticos y manejo del cultivo de yuca.....	35
3.3.5. Simulación y cartografía de resultados.....	35

<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>36</b>
4.1. Caracterización del cultivo de yuca.....	36
4.2. Cartografía del rendimiento.....	41
4.3. Análisis de factores.....	43
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>
<b>6. LITERATURA CONSULTADA.....</b>	<b>46</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>50</b>



## ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Producción de yuca en Veracruz en los años 2005-2009.....	14
Cuadro 2. Principales estados de México por superficie cosechada del cultivo de yuca (hectáreas).....	14
Cuadro 3. Paquete tecnológico del cultivo de yuca.....	16
Cuadro 4. Metodología y fuentes utilizadas para calcular datos de suelo faltante.....	29
Cuadro 5. Perfil típico de suelo Cambisol calcárico .....	30
Cuadro 6. Manejo del cultivo de yuca.....	32
Cuadro 7. Estadísticas generales de producción promedio (2001-2009) y la producción potencial esperada bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz del cultivo de yuca.....	37
Cuadro 8. Composición química del tubérculo de yuca y su tasa de conversión etanol de primera generación (1G).....	37
Cuadro 9. Valores promedio típicos de la composición de los co-productos resultantes del proceso industrial para producir etanol a partir de almidón de yuca.....	38
Cuadro 10. Composición promedio típica de los residuos de cosecha de la yuca.....	39
Cuadro 11. Uso actual y potencial en México de los productos económicamente importantes, co-productos y residuos de cosecha de yuca.....	42
Cuadro 12. Ejemplo de URH afectadas por variables climáticas y edáficas.....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución por región de la producción total de etanol.....	7
Figura 2. Evolución de la producción anual de etanol en México.....	7
Figura 3. Fuentes primarias de energía a nivel mundial.....	9
Figura 4. Ubicación geográfica del estado de Veracruz.....	23
Figura 5. Climas del estado de Veracruz.....	24
Figura 6. Topografía del estado de Veracruz.....	25
Figura 7. Suelos del estado de Veracruz.....	26
Figura 8. Uso de suelo en el estado de Veracruz.....	27
Figura 9. Distribución de las 95 estaciones usadas.....	31
Figura 10. Mapa de rendimientos del cultivo de yuca.....	42

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Datos estadísticos de la estación meteorológica 3077.....	50
Anexo 2. Clasificación por profundidad del estado de Veracruz.....	51
Anexo 3. Clasificación por textura de suelo del estado de Veracruz.....	52
Anexo 4. Clasificación por contenido de M.O. en el suelo del estado de Veracruz.....	53
Anexo 5. Clasificación por temperatura del estado de Veracruz.....	54
Anexo 6. Clasificación por radiación del estado de Veracruz.....	55
Anexo 7. Clasificación por precipitación del estado de Veracruz.....	56
Anexo 8. Ejemplo de URH afectadas por parámetros climáticos y edáficos.....	57

## RESUMEN

Se consideró al cultivo de yuca como insumo para producir bioetanol en el estado de Veracruz, y para conocer su potencial productivo fue necesario determinar primero la capacidad de dicho cultivo para producir bioetanol a partir de toda su biomasa y después conocer el rendimiento potencial en el estado, en función de la variación de climas y suelos. El resultado se expresó en una zonificación con base en las variaciones del potencial de producción, utilizando un modelo de simulación (SWAT) y el Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) que permitieron simular y cartografiar el cultivo de yuca de temporal en toda la superficie del estado en diferentes rangos de rendimiento que se correlacionaron con algunos parámetros climáticos (temperatura, precipitación, y radiación) y edáficos (profundidad, textura y materia orgánica) observando que el rendimiento del cultivo puede variar cuando algunos o todos los parámetros no presentan las condiciones óptimas requeridas por el cultivo. Con los rendimientos de tubérculo se realizó la conversión de biomasa fermentable a etanol (1<sup>o</sup> generación) de acuerdo al rendimiento ha<sup>-1</sup> de una zona marginal o potencial. El cultivo de yuca como materia prima cuenta con buena aptitud bioenergética estableciendo su producción en el estado de Veracruz.

**Palabras clave:** yuca, bioetanol, rendimiento, caracterización, zonificación, cartografía.

## ABSTRAC

Yuca crop was considered as an ingredient to produce bioethanol in Veracruz State, México. To know its productive potential, it was necessary to determine first its capacity to produce ethanol from its biomass, and then to know its yield potential in Veracruz State as a function of variation of climates and soils. The result was expressed in a zonification based on variation of production potential, using a simulation model (SWAT), and the Information System Geographic (ArcGIS), which permitted to simulate and to make a cartography of yuca crop under rainfall production system, at different yield ranges that were correlated with some climatic parameters (temperature, rainfall, and solar radiation), and edafic (dept, texture, and organic matter) considering that crop yield may vary when parameters do not present the best conditions required by the crop. Based on further crop yield, it was calculated the conversion of fermentable biomass to ethanol according to  $\text{yield}\cdot\text{ha}^{-1}$  of a potential zone. As an ingredient, yuca crop shows good bioenergetic aptitude in Veracruz State.

**Key words:** Yuca, bioethanol, yield, characterization, zonification, cartography.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estilo de vida de las personas en la actualidad demanda grandes cantidades de energía convencional, para el desarrollo de sus actividades cotidianas, esto ha ocasionado el agotamiento de los combustibles fósiles, que cada vez es más difícil encontrar y extraer, añadido a esto los conflictos bélicos y el aumento acelerado en el precio. Además las principales emisiones de CO<sub>2</sub> que se vierten a la atmósfera provienen del sector transporte el cual consume la mayor parte de los combustibles fósiles.

Este problema mundial nos conduce a la búsqueda de nuevas alternativas, en especial los biocombustibles. Entre las materias primas para la producción de biocombustibles pueden destacar: caña de azúcar, maíz, yuca, arroz, sorgo dulce, higuera, palma de aceite, soya, algodón entre otros.

Actualmente Brasil y Estados Unidos disponen de aproximadamente del 80% de la producción mundial de biocombustibles. Estos países cuentan con un marco regulador para la producción, uso y manejo de etanol, con estos avances otros países como México, han establecido leyes y apoyos en las investigaciones para contar con un respaldo en caso de una crisis energética.

En este trabajo se caracteriza al cultivo de yuca como insumo para obtener bioetanol para el estado de Veracruz, para esto fue necesario conocer su potencial de producción, y posteriormente la conversión de tubérculo a etanol, mediante la calibración del ArcSWAT se elaboró un mapa de rendimiento del cultivo de yuca bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz. Mediante la correlación de algunos parámetros climáticos y edáficos se localizaron los rendimientos más altos del cultivo.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo general.**

Caracterizar el cultivo de yuca como materia prima para bioetanol y cartografiar su potencial productivo en el estado de Veracruz.

### **1.1.2. Objetivos específicos.**

- Caracterizar el cultivo de yuca como insumo para producir bioetanol y sus subproductos.
- Simular el rendimiento del tubérculo y biomasa total del cultivo de yuca
- Cartografiar el rendimiento del tubérculo y biomasa total del cultivo
- Determinar el rendimiento potencial de bioetanol de yuca en el estado de Veracruz con base en el rendimiento simulado y la caracterización del cultivo.

## **1.2. HIPÓTESIS**

### **1.2.1. Hipótesis general.**

El rendimiento potencial del cultivo de yuca como insumo para elaborar bioetanol en el estado de Veracruz se encuentra sujeto a las variaciones edafoclimáticas con respecto a la fisiología del cultivo.

### **1.2.2. Hipótesis específica.**

- El cultivo de yuca presenta características adecuadas como insumo para elaborar bioetanol.
  
- El rendimiento del cultivo de yuca se encuentra sujeto a las variaciones edafoclimáticas del estado de Veracruz.
  
- Existe una variación en la distribución geográfica de los intervalos de rendimiento de yuca en el estado de Veracruz.
  
- La producción de bioetanol de yuca en el estado de Veracruz están en función del rendimiento potencial del cultivo.



## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. BIOCOMBUSTIBLES.**

#### **2.1.1. Características generales de los Biocombustibles.**

Los biocombustibles surgen en el mercado mundial muy ligados a la resolución de los problemas ambientales y de ahí que su promoción se fundamenta en varios argumentos sobre reducción de la contaminación, mas tarde los biocombustibles pasan a tener mayor importancia ya que contribuye al aseguramiento y suministro de productos energéticos (Hilbert, 2008).

La producción de los biocombustibles puede ser a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial, desechos orgánicos o cualquier forma de biomasa (Hernández, 2008). La producción mundial de biocombustibles muestra en años recientes un fuerte crecimiento, siendo el bioetanol el principal producto La producción de bioetanol se triplico entre los años, 2000 y 2007 (Goldstein y Gutman, 2010).

#### **2.1.2. Bioetanol de primera generación.**

El etanol es un compuesto orgánico de formula  $\text{CH}_3 \text{CH}_2 \text{OH}$ , es liquido, incoloro de olor característico, que se funde a  $-114.1^\circ\text{C}$  y tiene una densidad de  $0.789 \text{ g/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ . La gran mayoría la palabra alcohol la utilizada para denominar al alcohol etílico o etanol (Domínguez, 2008), y se produce a partir de azucares o almidones contenidos en diferentes materias primas vegetales, tales como la caña de azúcar, maíz, remolacha azucarera, trigo, sorgo y yuca (CEPAL, 2008).El bioetanol representa el 90% del biocombustible producido a nivel mundial (el restante 10% es biodiesel) (Barba, 2007).

Brasil es pionero, primer productor y exportador mundial de alcohol carburante Con el alza de los precios de petróleo de los años setentas decidió aumentar el

porcentaje de mezclas progresivamente hasta llegar al 20% a principios de los ochentas. Actualmente las calles de Rio, Sao Paulo o Bahía la mayoría de sus vehículos usan etanol carburante (García y García, 2006).

Latinoamérica es un líder en la producción de los biocombustibles: Argentina es uno de los mayores productores y exportadores de biodiesel y Brasil es el mayor exportador de etanol del mundo en ambos casos de primera generación. Los biocombustibles de primera generación son típicamente aquellos producidos de biomasa comestible, algunos ejemplos son la caña de azúcar, maíz o la remolacha (James, 2009).

Aproximadamente el 85% de la producción mundial de biocombustibles líquidos está representada por etanol. Los principales productores de bioetanol son Brasil y Estados Unidos de América, aportan casi el 90% de la producción mundial, el 10% restante se divide entre Canadá, China, la Unión Europea y la India (Alarcón, 2010).

La principal fuente para la producción de bioetanol es la caña de azúcar, en prácticamente todos los países ALC (América Latina y el Caribe), ya que la disponibilidad de excedentes es generalizada. El potencial de producción de bioetanol a partir de maíz, trigo y sorgo está concentrado en Argentina, país con ventajas comparativas para la producción de cereales. En conjunto estos podrían producir un total de casi 20 mil millones de litros de bioetanol por año, de los cuales un 58% corresponde a la caña de azúcar, 22% al maíz y el 18% al trigo. (CEPAL ,2008).

### **2.1.3. Bioetanol de segunda generación.**

La segunda generación de los biocombustibles, incluye aquellos realizados a partir de materia prima proveniente de biomasa lignocelulósica como por ejemplo los residuos de cultivos, actividades forestales y de otras actividades no agrícolas.

Aunque este tipo de combustibles todavía no se produce a escala industrial, se espera que los procesos para producción sean viables en los próximos 10 años. Los biocombustibles de segunda generación son producidos de biomasa no comestible (James, 2009).

Para producir los biocombustibles de segunda generación todavía están en etapas de investigación y desarrollo de tecnologías que se consideran que elevarán los costos de producción. Los biocombustibles de segunda generación serán una alternativa muy efectiva para remplazar a los combustibles fósiles sin utilizar cultivos alimenticios y principalmente ayudar a combatir el calentamiento global (IICA, 2007a). Utilizando los residuos como todos los materiales orgánicos, que son producidos como subproductos de la cosecha o del procesamiento de cultivos agrícolas (CEPAL, 2008).

Los biocombustibles de segunda generación se obtienen de materias primas no alimentarias, se pueden cultivar en tierras marginales que no se emplean para cultivos de alimentos, en este sentido permite una mayor diversificación con nuevas materias primas, nuevas tecnologías y nuevos productos finales, promoviendo así el desarrollo agrícola y agroindustrial (Salinas y Gasca, 2009).

#### **2.1.4. Estadísticas de producción de biocombustibles.**

El crecimiento en la producción de bioetanol ha pasado de menos de 20.000 millones de litros en el año 2000 hasta 90.000 millones en 2009. La producción se ha registrado principalmente en Estados Unidos, Brasil y Alemania (Torres y Carrera, 2010).

En la Figura 1 y 2 se presentan estadísticas básicas de la producción total de etanol de primera generación por región y en México.

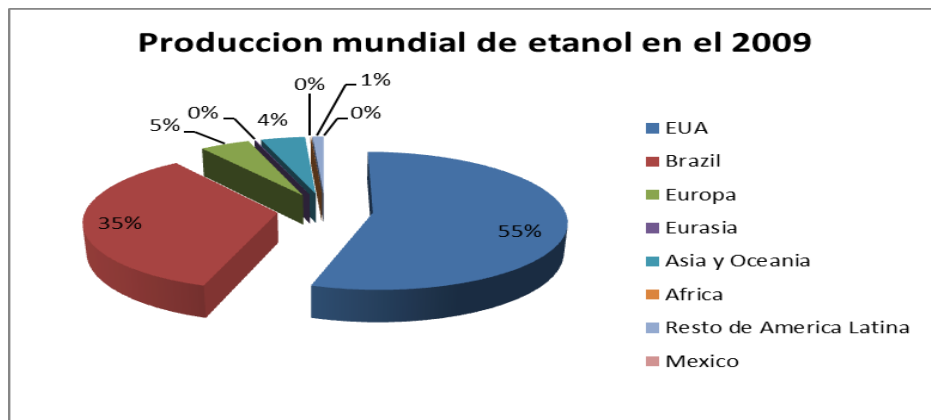


Figura 1. Distribución por región de la producción total de etanol (77.03 billones de litros por año) en el año 2009. Fuente: (USA-DOE, 2010).

A partir de año 2008 hasta nuestros días México mostro gran interés en la producción de etanol, tomando como ejemplo a los países líderes en la producción de biocombustibles.

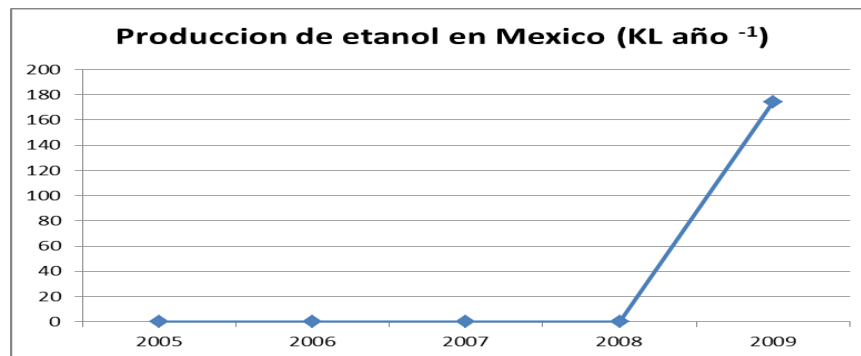


Figura 2. Evolución de la producción anual de etanol en México. Fuente: (USA-DOE, 2010).

### 2.1.5. Rentabilidad de los biocombustibles.

La producción de los biocombustibles es económicamente menos rentable que los combustibles convencionales, esto hace que el sector necesite del respaldo

gubernamental para su desarrollo y competitividad con respecto a los biocombustibles derivados del petróleo (Merino y Nonay, 2009).

Se considera que la producción de biocombustibles es un buen negocio, esto depende del tipo de cultivo, los niveles de productividad y los costos, pero sobre todo de la existencia de una política clara, con reglas de juego bien establecidas por parte del gobierno y del sector privado en el lugar en que se piense producir (IICA ,2007a).

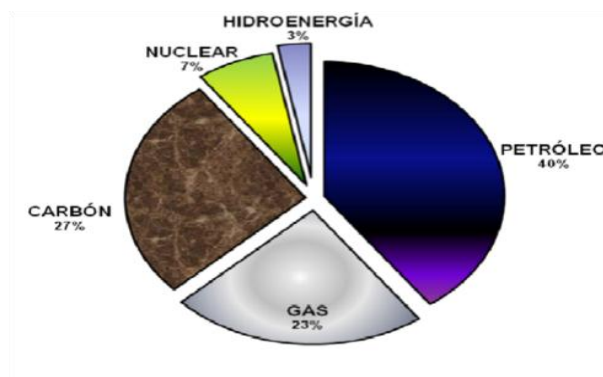
Según las Secretarías de agricultura ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación (SAGARPA), y de energía (SENER) existe una oportunidad importante para que México emprenda la producción de etanol a gran escala, pero antes deben superarse varios retos políticos, económicos, de seguridad alimentaria y de desarrollo de tecnología. Sin embargo la producción de etanol a partir de caña de azúcar o diversos granos con las tecnologías existentes no es factible en México, debido a la demanda de estos productos para consumo humano (Carreón *et al.*, 2009).

## **2.2. FACTORES QUE PROMUEVEN LA PRODUCCIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES**

### **2.2.1. El petróleo y la seguridad energética.**

Venezuela, México, Brasil son los países de América latina que reúnen el 13% de las reservas probadas de petróleo en el mundo, en conjunto estos países acumulan el 94% de las reservas y el 81% de la producción de la región, estos países forman parte del grupo de las 20 naciones con mayores reservas a nivel mundial, el resto se encuentra en una situación crítica en términos de seguridad energética (IICA, 2010).

El desarrollo tecnológico ha ido de la mano con el suministro de energía a través de la historia de la humanidad. Los recursos que dan suministro de energía al planeta son muchos, aunque desde los inicios de la era industrial la principal fuente de suministro ha sido el petróleo; sin embargo en los últimos años ha existido un uso desenfrenado de los recursos energéticos por lo tanto se pronostica escases y un aumento en sus precios para un futuro cercano. En la siguiente Figura 3 podemos apreciar que el petróleo abastece el 40% de la demanda mundial de energía (Carreón *et al.*, 2009).



**Figura 3. Fuentes primarias de energía a nivel mundial**

Según investigaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana (2011), el resultado de la política petrolera que se ha aplicado en México es que ahora importamos cuatro de cada 10 litros que consumimos, este porcentaje se ha incrementado en los últimos años de 41 a 43% y la dependencia al exterior es mayor. México se encuentra ante una eventual crisis energética debido a la acelerada producción y reducción de las reservas probadas de petróleo.

En julio de 2002, el precio medio del barril era de 25 dólares, a principios del mes de septiembre de ese año, aumento hasta 27 y 30 dólares por barril. Durante la guerra de Irak e Irán los principales países del mundo occidental llegaron a acuerdos para crear reservas estratégicas de petróleo en sus respectivos

territorios, reservas que podían ser utilizadas en épocas de crisis energética generalizada para regular los precios (Ivekovic ,2003).

### **2.2.2. Cambio Climático y calentamiento global.**

De acuerdo a las evaluaciones cuantitativas realizadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IIPCC) la temperatura media mundial de la superficie aumentará entre 1.8°C y 4.0°C para 2100, por lo tanto se considera necesario estabilizar el recalentamiento mundial por debajo de 2°C a fin de evitar efectos sumamente peligrosos del cambio climático, el objetivo es reducir la mitad de las emisiones de CO<sub>2</sub> para el 2050 (FAO, 2009).

Los cultivos utilizados para la producción de biocombustibles, pueden reducir o compensar las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la eliminación directa de dióxido de carbono del aire a medida que crecen, lo almacenan en la biomasa y el suelo. Además de producir biocombustibles, pueden generar productos complementarios como alimento para animales y con ello se ahorraría la energía para elaborarlos de otra forma. En la producción de biocombustibles de primera generación, ofrecen reducciones de los GEI en un 20% al 60%, si se emplean sistemas más eficientes (Alarcón, 2010).

Se calcula que el uso de una mezcla de E10 (10% de etanol y 90% de gasolina) sería suficiente para reducir entre el 12% al 19% los gases de efecto invernadero, el 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el 50% de las emisiones de partículas finas que causan problemas respiratorios y de las emisiones de sustancias orgánicas volátiles que producen el smog (IICA, 2007a).

### **2.2.3. Desarrollo rural.**

La producción de los biocombustibles puede tener un impacto positivo sobre el empleo y los medios de vida, especialmente cuando el cultivo involucra a agricultores de pequeña escala de las áreas rurales (Dufey, 2006).

El orden social a despertado gran interés por la necesidad de diversificar las fuentes de energía, con ello contribuir a la generación de empleos, con un impacto positivo en el crecimiento económico en general. Los biocombustibles necesitan de una larga base de producción de materia prima antes del procesamiento y transporte, esto implica ampliar la oferta de empleo y renta, y fortalecer el desarrollo económico en los países, especialmente en el área rural (Gazzoni, 2009).

La dotación de recursos naturales de México sugiere que el país puede desarrollar una importante industria de agro-energía y biocombustibles, y contribuir a disminuir la pobreza en zonas donde los costos de los combustibles fósiles los hacen inalcanzables (IICA, 2007b).

#### **2.2.4. Seguridad alimentaria.**

Los biocombustibles líquidos de primera generación derivados de cereales principalmente del maíz compiten de forma directa con la alimentación humana y son destinados al sector del transporte (FAO, 2008). La producción de biocombustibles puede ocasionar que existan ganadores y perdedores, por una parte en el aumento en el precio de los productos básicos alimenticios perjudica a los importadores, pero esto podría estimular la producción agrícola de los pequeños productores, en los países en desarrollo especialmente a los de bajos ingresos y con déficit de alimentos (FAO, 2009).

El conflicto inherente en los biocombustibles de primera generación es justamente que su materia prima es también alimento, y que su utilización en alguna medida afecta el precio de la comida. Según la teoría, al competir en dos mercados (como alimento y como energía), estas materias primas tienen un valor comercial mayor al de la biomasa no comestible, lo cual tendería a incrementar su precio. Además la biomasa comestible, normalmente requiere de suelos ricos en nutrientes y con



abundancia de agua. Contrariamente los biocombustibles de segunda y tercera generación típicamente crecen en suelos marginales (James, 2009).

El incremento de la producción de los biocombustibles pondrá en riesgo la seguridad alimentaria y aumenta los precios de ciertos alimentos, esto podría ser cierto si tierras destinadas a la siembra de cultivos alimenticios se utiliza para la producción de biocombustibles, o si se reemplaza la finalidad original de esos cultivos y se usan para la producción de biocombustibles, se debe tomar en cuenta que más del 50% de la población de América Latina y el Caribe vive y depende del sector rural (IICA, 2007a).

#### **2.2.5. Políticas para impulsar el desarrollo de los biocombustibles.**

México tiene un gran interés por conocer y desarrollar la tecnología de los biocombustibles, esto llevo a la cámara de diputados y senadores a desarrollar una ley que impulse y ampare a la investigación de los bioenergéticas, esta ley fue proclamada en la “ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticas” que fue publicada en el diario oficial de la federación (2008), con la idea de impulsar el interés por la comunidad científica y académica, para el desarrollo de proyectos que lleven a México a la sustentabilidad energética (Diario Oficial de la Federación, 2008).

La industria de los biocombustibles se ha venido desarrollando dese los años setentas sin embargo, es ahora cuando por necesidad y preocupación ambiental los gobiernos de distintos países líderes en producción de biocombustibles ya cuentan con un marco regulador en la producción, distribución y uso a gran escala de etanol. Aunque en ALC algunos países todavía no han formulado un marco regulador otros ya cuentan con iniciativas de ley que están en procesos de revisión por parte de los congresistas (IICA, 2010).

Los países que lideran la producción de etanol, como Estados Unidos, Brasil, Colombia, Argentina y México cuentan con un marco regulador para la producción, uso y manejo del etanol, han establecido porcentaje para la mezcla de gasolina con el etanol y brindan incentivos para su producción (IICA, 2007a).

México aprobó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticas el 31 de enero del 2008, la secretaria de energía publicó el decreto de dicha ley en el Diario Oficial de la Federación, esta ley tiene como propósito la promoción y el impulso de las bioenergéticas para contribuir en el desarrollo sostenible del campo (Domínguez, 2008).

## **2.3. EL CULTIVO DE YUCA EN VERACRUZ**

### **2.3.1. Superficie cultivada de yuca.**

En el estado de Veracruz esta planta se conoce desde hace décadas y se le encuentra de manera silvestre en el campo y en traspatio; sin embargo, apenas figura en el anuario estadístico de cultivos en el estado de Veracruz con una producción de 7.4 toneladas, obtenida de una hectárea y media de cultivo (Disponible en: [www.funprover.org/agroentorno/septiembre/Yuca.pdf](http://www.funprover.org/agroentorno/septiembre/Yuca.pdf) ).

Con la información recopilada en la página del SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), sobre la producción de yuca en el estado de Veracruz, existen solo dos municipios con producción y superficie sembrada para los años 2005-2009 donde pudimos obtener los promedios de producción y superficie sembrada en esos municipios ver Cuadro 1. De acuerdo a la superficie de yuca cosechada a nivel nacional son pocos los estados que tienen una buena producción Cuadro 2.

**Cuadro 1. Producción de yuca en Veracruz en los años 2005-2009.**

<b>municipio</b>	<b>Sup. sembrada (ha)</b>	<b>Sup. cosechada (ha)</b>	<b>producción (ton)</b>	<b>rendimiento (ton/ha)</b>	<b>valor de producción (miles de pesos)</b>
Martínez de la Torre	1	1	5	5	7.5
Tantoyuca	11	11	39	3.585	174.37

**Fuente: SAGARPA-SIAP.**

**Cuadro 2. Principales estados de México por superficie cosechada de yuca en hectáreas.**

<b>ESTADOS</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
Tabasco	1,113	798	1,152	872	645
Morelos	184.9	160.9	233.2	238.2	187.1
Michoacán	20	40	100	100	100
Veracruz	0.0	0.0	1.0	0.0	10
Guerrero	6.0	9.5	3.0	3.0	5.0
TOTAL	1,335.9	1010.4	1,501.2	1,235.2	950.1

**Disponible en: [www.infoagro.com/hortalizas/yuca.htm](http://www.infoagro.com/hortalizas/yuca.htm)**

La superficie cosechada de yuca en el año 2009, en el estado de Veracruz fue de 12 hectáreas y 38 toneladas como producción. (Disponible en: [www.oeidrusveracruz.gob.mx](http://www.oeidrusveracruz.gob.mx) ).

Otros productores grandes de América Latina son Colombia que produce 2.1 millones de toneladas anuales y Paraguay que produce 2.0 millones. Con rendimiento de 10 t/ha en Colombia y 15 t/ha en Brasil y Paraguay, los rendimientos son altos debido al ciclo del cultivo de 18 meses que usan muchos productores. Aunque Brasil, Colombia y Paraguay producen más del 90 % de yuca

en las Américas, el cultivo también tiene gran importancia en varios países más pequeños (Cock ,1989).

### **2.3.2. Paquete tecnológico del cultivo.**

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), específicamente el campo experimental Cotaxtla Veracruz creó un paquete tecnológico para la producción del tubérculo de yuca para el ciclo agrícola 2011 en sistema tradicional y mecanizado que se muestra en el Cuadro 3 Recopilando información en varias fuentes, esta producción está enfocada a las características edáficas y climáticas de la región, con el propósito de que se obtengan los mejores rendimientos, se seleccionaron dos variedades (brasileña y la valencia) que presentan características sobresalientes por su adaptabilidad a las condiciones ambientales del estado.

El estado de Guerrero también se elaboró su propio manual para la producción de yuca en su región, y aprovechar este cultivo como alimento humano y animal por sus propiedades nutricionales (Ballesteros *et al.*, 2010). Al igual que México existen otros países que necesitan conocer el manejo de este cultivo, Lardizábal elaboró un manual de producción de yuca en Honduras en 2002, pero para el 2009 fue necesario considerar otros aspectos en el manejo de este cultivo, para lograr altos rendimientos y rentabilidad , considerando que este cultivo no es de subsistencia.

### Cuadro 3. Paquete tecnológico del cultivo de yuca

ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO POR HA.
<b>1.preparacion del suelo</b>				
Chapeo	Pases	1	368.00	368.00
Barbecho	Pases	1	552.00	552.00
Rastreo	Pases	2	644.00	1288.00
				<b>2,208.00</b>
<b>2.Semilla (mat. vegetativo)</b>				
Corte (selección. Emp. Rollos Trasporte.)		100	15.00	1,500.00
Flete (dentro de la unidad)	Flete	5	128.80	644.00
				<b>2,144.00</b>
<b>3.Siembra/(sembradora)</b>				
Tractor c/sembradora	Diesel	100	9.50	950.00
Operario y sembradora	Jornales	12	150.00	1800.00
Desinfección de semilla	Jornales	3	150.00	450.00
Insumos: Malathion	Lt	0.25	140.00	35.00
Captan	Kg	0.50	180.00	90.00
				<b>3,325.00</b>
<b>4.Control de malezas</b>				
1° desyerbe manual	Jornales	10	150	1500.00
2° desyerbe manual	Jornales	10	150	1500.00
				<b>3,000.00</b>
<b>5. 1ª fertilización (1° mes)</b>				
Urea	Kg	100	7.00	700.00
DPA	Kg	100	10.00	1000.00
KCl	Kg	50	12.00	600.00
Aplicación	Jornales	5	150.00	750.00
				<b>3,050.00</b>
<b>6. control de plagas</b>				
Insecticida (vidate)	lt	2	315.00	630.00
Insecticida (Tamaron)	lt	2	315.00	630.00
1° aplicación	Jornales	4	150.00	600.00

Insecticida (Ambush 34)	lt	1	450.00	450.00
2° Aplicación	Jornales	2	150.00	300.00
Adquisición <i>Trichogramas</i>	Placas	10	30.00	300.00
Liberación	Jornales	1	150.00	150.00
				<b>3060.00</b>

---

#### 7. 2ª fertilización (2º mes)

Urea	Kg	100	7.00	700.00
KCl	Kg	50	12.00	600.00
Aplicación	Jornales	5	150.00	750.00
				<b>2,50.00</b>

---

#### 8. cosecha manual

Corte de raíz y carga	Jornales	30	150.00	4500.00
Costales para empaque	costales	334	3.50	1169.00
<b>TOTAL</b>				<b>24,506.00</b>

---

**Fuente: campo experimental Cotaxtla Veracruz.-CIRGOC-INIFAP.**

### 2.3.3. Zonificación agroecológica

La zonificación agroecológica (ZAE) consiste en la identificación de áreas relativamente homogéneas, su caracterización con respecto a factores físicos (clima, suelo, forma de la tierra etc.) y biológicos (vegetación, fauna etc.) en relación a su potencial y uso para fines específicos. Reflejan una preocupación por el uso y manejo inadecuado de la tierra y pretende establecer el uso de procedimientos adecuados para potenciar el desarrollo de las actividades agrícolas a nivel regional y local (Arroyo y Araya, 2004).

La zonificación Agroecológica puede ser definida como el proceso de identificación de áreas con características propias que las diferencian de otras áreas; su Caracterización con respecto a factores físicos (clima, suelo, formas de la tierra), biológicos (vegetación y fauna) y socio económicos (presencia del hombre y sus actividades) y su evaluación con respecto al uso de tierras. la FAO estableció

metodologías para estimar la producción de alimentos en el mundo de once cultivos en diferentes zonas agroecológicas (FAO, 1996).

La Zonificación Agroecológica es una metodología desarrollada por la FAO en la búsqueda de soluciones a diferentes problemas de evaluación de recursos naturales como base para una agricultura sostenible. Las zonas agroecológicas se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima y características de suelo (Arbiol et al., 2001).

La zonificación agroecológica define zonas en base a combinaciones edáficas y climáticas, permitiendo así definir la aptitud de las tierras (FAO, 1997).

Existen propuestas de zonificación con diferentes prioridades sin embargo en ellas prevalecen las condiciones ecológicas, tales como clima, suelo, topografía, etc., que permiten definir las unidades con una mayor uniformidad (Tapia, 1997).

En México se han realizado varios trabajos de zonificación agroecológica, específicamente para identificar áreas con potencial productivo para el cultivo de maíz en los estado de Veracruz y Tabasco (Tinoco *et al.*, 2002).

## **2.4. EL MODELO SWAT**

### **2.4.1. El modelo SWAT y la extensión ArcSWAT.**

El Soil and Wáter Assessment Tool (SWAT), es un programa de un modelo hidrológico diseñado por el departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes. Se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca (Oñate y Aguilar, 2003).

El modelo SWAT permite realizar una predicción del comportamiento de cuencas hidrográficas complejas a largo plazo, está constituido por una serie de sub-modelos o módulos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos (Galván *et al.*, 2007).

El modelo está conformado por un conjunto de sub-cuencas, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo SWAT tiene la capacidad de predecir el cambio climático, por lo que se recomienda su estudio en la cuenca en estudio para la generación de mejores estrategias de manejo de la misma (Torres *et al.*, 2005).

#### **2.4.2. Trabajos de cálculo de potencial usando SWAT.**

Uribe y Quintero (2011) aplicaron el modelo para la cuantificación de todas las variables del balance hídrico del flujo del agua en el suelo, agua y la vegetación Galván *et al.*, (2007) aplicaron el SWAT en la simulación de un modelo hidrológico para poder cuantificar la carga contaminante transportada. Este modelo también fue aplicado para determinar la respuesta de la cuenca a la aplicación de cobertura vegetal (dependiendo del potencial del suelo) con el fin de disminuir la producción de sedimentos y así disminuir su efecto en la disponibilidad de agua (Oñate y Aguilar, 2003).

En México ya se han realizado trabajos aplicando el SWAT, Torres *et al.*, (2004) aplicó el modelo para evaluar la capacidad predictiva para simular la producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz en la cuenca.

## **2.5. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

### **2.5.1. Generalidades.**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para Mena 2007, son un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y



lógicamente en la captura, almacenamiento, análisis, transformación y presentación de toda la información geográfica y sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos, esta tecnología surgió de la necesidad de resolver problemas de un modo inmediato.

Devicic (2001), lo define como un sistema que puede organizar la información por relaciones geométricas y topológicas. Esta información puede ser ingresada al sistema y lograr salidas en formatos de graficas y reportes. Los resultados que se obtengan de un SIG, dependerá de lo bueno que sean los datos almacenados en él, mientras más detallada sea la información, nos permitirá mejores análisis y facilitará la toma de decisiones. El empleo de un SIG se dio por primera vez en Canadá, en 1962, con el objetivo de realizar un inventario del uso del suelo (Ochoa, 2003).

Peña (2006) nos habla de algunas generalidades del uso de esta herramienta, este autor define a los sistemas de información geográfica como un conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permite la gestión de datos organizados y referenciados espacialmente. Nos explica de forma simple y didáctica las ventajas y desventajas de los dos principales métodos de organización de datos espaciales en el espacio digital como son el formato Vectorial (puntos, líneas y polígonos) y el formato Raster (malla de celdas o pixeles).

### **2.5.2. ArcMap.**

ArcMap es una aplicación de ArcGIS que proporciona las herramientas básicas para visualizar los datos espaciales, incluyendo funciones de análisis; creación y edición de datos geográficos, así como la generación de gráficos, informes y mapas con calidad de presentación (Disponible: [titulaciongeografia-sevilla.es/web/contenidos/.../IntroduccionArGISBP.pdf](http://titulaciongeografia-sevilla.es/web/contenidos/.../IntroduccionArGISBP.pdf)).

El ArcGIS Desktop es como un conjunto de aplicaciones integradas: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox, permite realizar tareas de SIG sencillas y avanzadas: mapeo, administración de datos, análisis especial, edición de datos y geoprocesamiento. ArcMap es una aplicación central de ArcGis. Este modulo permite la visualización, consulta, análisis y presentación de los datos geográficos (Vicente y Behm, 2008).

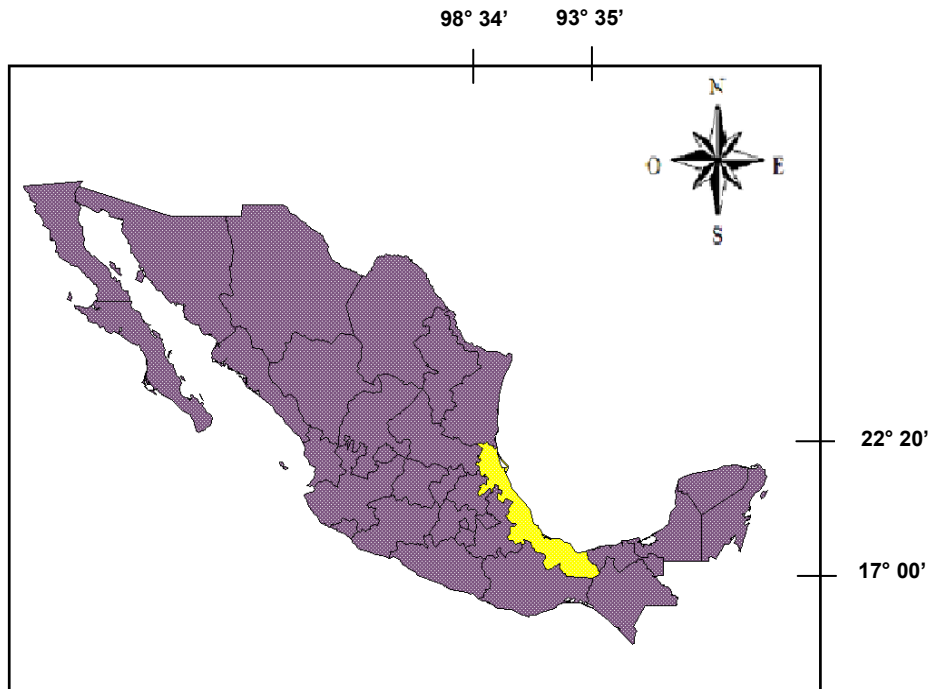
Es una aplicación central de ArcGIS Desktop. Esta aplicación SIG se usa para todas las actividades relacionadas al mapeo, incluyendo cartografía, análisis de mapas y edición. Esta aplicación se trabaja esencialmente con mapas. Los mapas tienen un diseño de página que contiene una ventana geográfica, o una vista con una serie de layers, leyendas, barras de escala, flechas indicando el norte y otros elementos (Disponible en: [www.geoinfo.cl/pdf/Curso\\_ArcView.pdf](http://www.geoinfo.cl/pdf/Curso_ArcView.pdf).)

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. ÁREA DE TRABAJO**

##### **3.1.1. Ubicación geográfica del estado de Veracruz.**

El desarrollo de este proyecto de tesis, se realizó en el estado de Veracruz que se ubica a lo largo del golfo de México, en una franja costera de 720 kilómetros de longitud. Este territorio está conformado por grandes montañas, bosques serranos, bosques mesofilos, selvas tropicales, fértiles llanuras, caudalosos ríos, cascadas, lagunas y costas. Su privilegiada posición geográfica hace a Veracruz un espacio de gran potencial para el desarrollo nacional. Con una superficie de 7.18 millones de hectáreas, Veracruz es el decimo primer estado de la Republica Mexicana en extensión y representa 3.7% de la superficie total del país. Colinda al Norte con Tamaulipas y el Golfo de México; al Este con el Golfo de México, Tabasco y Chiapas; al Oeste con Puebla, Hidalgo y San Luis potosí y al Sur con Chiapas y Oaxaca. El estado de Veracruz se localiza entre los 17° 00' y 22° 20' latitud norte y entre los 93° 35' y 98° 34' longitud oeste, a lo largo del golfo en la zona tropical del sureste de México Figura 4. Este estado posee una gran riqueza hidrológica, el 35% de las aguas superficiales mexicanas atraviesan el territorio veracruzano (Monografía del edo. Veracruz, 2009).



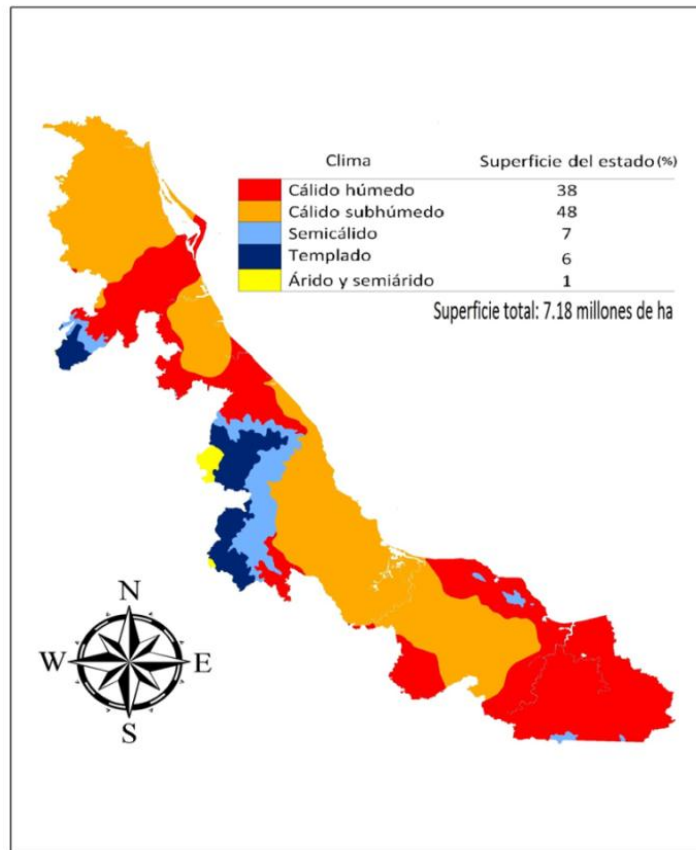
**Figura 4. Ubicación geográfica del estado de Veracruz.**

Las siguientes Figuras (5, 6, 7 y 8) representan los mapas de la distribución geográfica de los climas, suelos, topografía y el uso de suelo respectivamente, obtenidos a partir de mapas temáticos digitales escala 1:250,000 adquiridos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

### **3.1.2. Clima.**

Existen distintos climas distribuidos sobre la superficie de la entidad. Siendo el cálido sub húmedo con abundantes lluvias en verano el predominante por presentarse en más de la mitad de la superficie del estado.

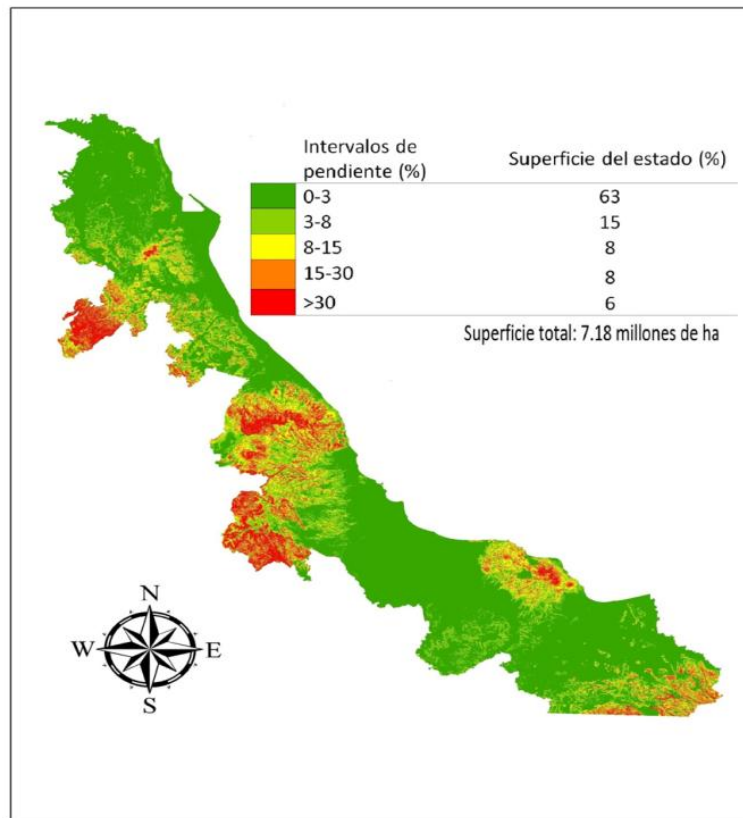
En la Figura 5, se puede apreciar que la mayor parte de la superficie del estado (86%) predominan los climas tropicales cálidos húmedos (Am y Af) y cálidos sub-húmedos (Aw0, Aw1, Aw2). El resto de la superficie (14%), predominan los climas Semi- cálido húmedo y sub-húmedo, templado húmedo y sub-húmedo, y clima árido y semiárido.



**Figura 5. Climas del estado de Veracruz**

### **3.1.3. Topografía.**

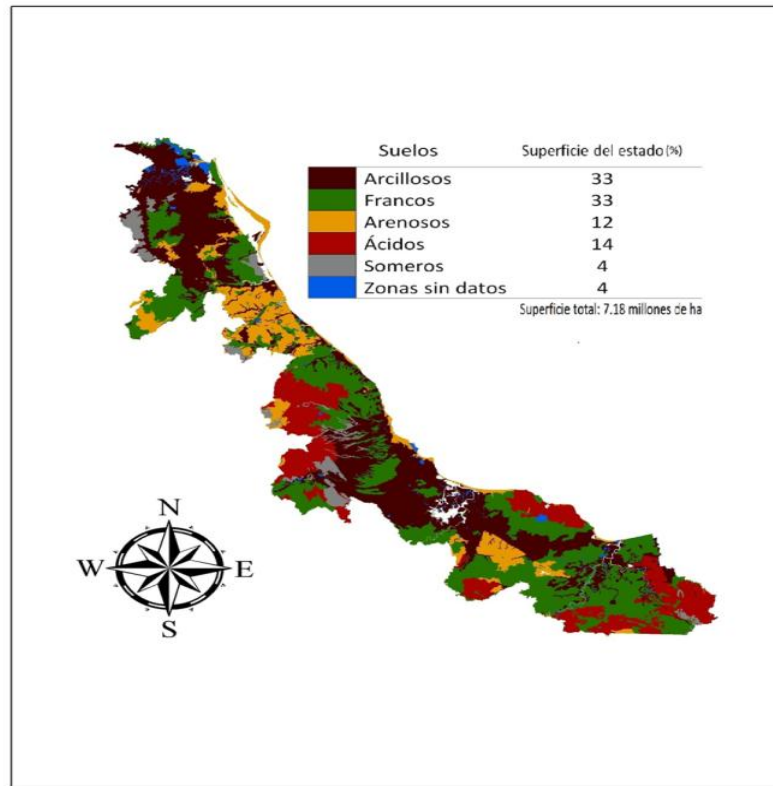
El 78% de la superficie del estado es plano con pendientes menores del 8%, mientras que el 16% de la superficie presenta pendientes entre 8 y 30%. Y el 16% restante presenta pendientes mayores de 30% en las zonas más montañosas del estado. Nótese que existe una estrecha relación entre el clima y la topografía del estado: los climas cálidos húmedos y sub-húmedos predominan en las zonas planas, mientras que en las zonas de transición predominan los climas semi-cálidos húmedos y sub-húmedos. La Figura 6 nos muestra la topografía del estado de Veracruz.



**Figura 6. Topografía del estado de Veracruz**

#### **3.1.4. Suelo.**

El estado de Veracruz comprende una gran diversidad de suelos que se muestran en la Figura 7, y están relacionados estrechamente con el clima y la topografía. Los suelos arcillosos ocupan el 33% de la superficie, se distribuyen principalmente en el norte y centro-sur del estado, en zonas planas con pendientes menores de 8% bajo climas cálidos húmedos y subhúmedos, los suelos francos otro 33% también en zonas planas con pendientes menores de 15% bajo climas cálidos y subhúmedos. Los arenosos el 12%, se localizan en áreas compactas en las zonas norte y sur del estado, y a lo largo de la costa con clima cálido sub húmedo.



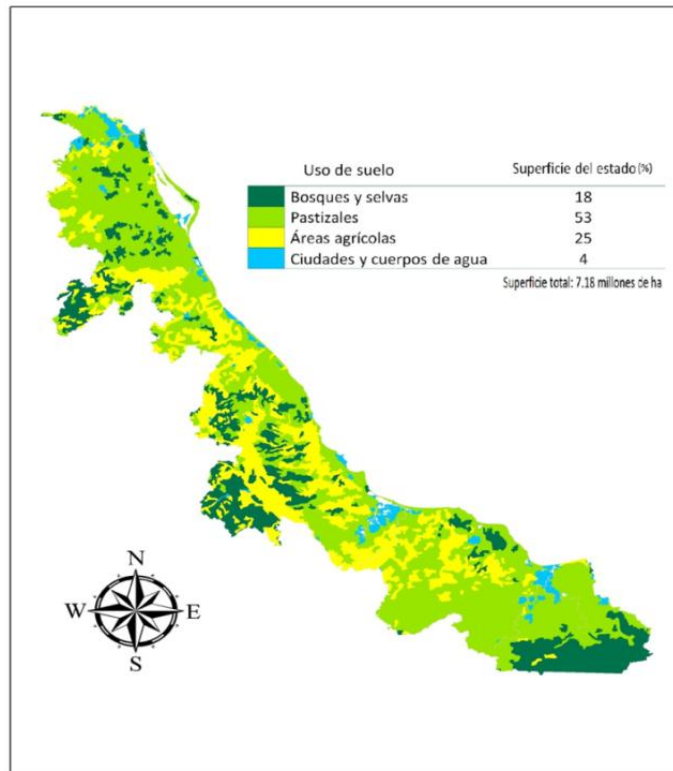
**Figura 7. Suelos del estado de Veracruz**

### **3.1.5. Uso de suelo.**

En Veracruz cerca del 50% de la superficie total representa características favorables para realizar agricultura mecanizada continua, con diferentes grados de amplitud. La entidad cuenta con grandes superficies arboladas, cubiertas principalmente por selvas y en menor escala por bosques de coníferas y latifoliadas.

El uso del suelo en el estado de Veracruz está clasificado en bosques y selvas, pastizales, áreas agrícolas, ciudades y cuerpos de agua. En la Figura 8 se observa que la mayor parte de la superficie está ocupada por pastizales distribuidos en el estado ocupando el 53% del área, el 25% es actualmente área agrícola principalmente en el centro del estado y algunas regiones del norte y sur;

los bosques y selvas se encuentran distribuidas en varias regiones ocupando así el 18% del área. El 4% restante es ocupando por las ciudades y cuerpos de agua.



**Figura 8. Uso del suelo en el estado de Veracruz.**

### **3.1.6. Relación del clima, pendiente, tipo y uso de suelo.**

Considerando las Figuras de la 5 a la 8 se deduce que la relación entre el clima, la pendiente, el tipo de suelo y el uso de suelo es evidente en la distribución de cada una de éstas; por ejemplo en zonas con pendientes bajas que presentan clima cálido subhúmedo con suelos francos son adecuados para la agricultura. En el caso de suelos con pendiente media con suelos francos y/o ácidos con clima semicálido es ocupada por bosques y selvas. De esta manera si se sobreponen los mapas podemos determinar la relación de éstas de tal manera que caracterice cada unidad de superficie.



## **3.2. REQUERIMIENTOS DEL MODELO SWAT**

### **3.2.1. Generalidades.**

Para la simulación del rendimiento del cultivo de yuca usando el SWAT, fueron requeridos tres diferentes tipos de archivos: a) Mapas que nos permiten conocer la ubicación espacial de cada categoría, b) Bases de datos que contienen la información referente a cada categoría y c) Catálogos archivos de texto que permiten indicar al modelo la información a usar de sus bases de datos.

### **3.2.2. Mapas.**

Los mapas que el modelo utilizó para realizar este trabajo se presentaron en formato “grid” (requerimiento del software) con una cuadrícula de 90 m (escala del modelo de elevación digital usado), con una proyección Universal Trasversa del Mercator (UTM) en la zona 14 del hemisferio norte, con base en el elipsoide WGS84, esta proyección fue considerada por ajustarse más a la superficie del estado, pese al hecho de que parte de la superficie del estado se localiza en la zona 15 del mismo hemisferio. Los cuatro mapas utilizados fueron:

- El DEM que fue elaborado a partir del mapa de curvas de nivel, adquirido de INEGI.
- El mapa de edafología que se elaboró a partir del mapa de edafología 1:250000 serie 3 de INEGI, separando los suelos que presentaban fase lítica en nuevas categorías.
- El mapa de ríos de INEGI.
- El mapa de uso de suelo se elaboró considerando toda la superficie del estado como área potencial para la siembra del cultivo de yuca, con ello cumplir los objetivos del trabajo.

### **3.2.3. Base de datos y catálogos.**

Las bases de datos necesarias para realizar las simulaciones y cálculos se encuentra en Access (archivo del programa). Para la simulación y el rendimiento del cultivo de yuca fue necesario modificar algunas de las bases de datos para incluir nuevas categorías o adoptar las existentes de acuerdo a las condiciones locales. Las bases de datos modificadas fueron edafología, parámetros fisiológicos del cultivo, clima, manejo y fertilizantes.

#### **3.2.3.1. Base de datos edafológicos.**

El programa cuenta con una base de datos edáficos, sin embargo fue necesario crear una nueva para el estado de Veracruz ya que la existente es propia para los suelos de Estados Unidos. Por tal razón se elaboró un perfil típico para cada una de las 59 clases de suelo (46 sub unidades FAO + 13 nuevas clases creadas por presentar fase lítica) de acuerdo a la descripción de la sub unidad y a los datos analíticos de 829 perfiles de suelo presentados por INEGI en cartas edafológicas para los 7 estados (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintan Roo, Chiapas y Oaxaca) de la zona tropical del sureste de México. Fue necesario estimar algunos datos faltantes y que eran necesarios para completar la base de datos del programa, estas se obtuvieron a partir de diferentes fuentes como se muestra en el Cuadro 4, y a manera de ejemplo el Cuadro 5, se presentan los datos ingresados al programa para el perfil típico del suelo Cambisol Calcárico.

#### **Cuadro 4. Metodología y fuentes utilizadas para calcular los datos de suelo faltante.**

---

<b>Parámetro</b>	<b>Método usado para su obtención</b>
Profundidad	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Textura	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Materia orgánica	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Conductividad eléctrica	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>

Conductividad hidráulica saturada	A partir de textura del suelo <sup>2</sup>
Densidad aparente	A partir de textura del suelo <sup>2</sup>
Capacidad de agua disponible	A partir de textura del suelo <sup>2</sup>
Carbono orgánico	Carbono orgánico=0.95*(Materia orgánica) <sup>3</sup>

$$USLE\_K = \frac{K_{usle}}{100} = \frac{0.00021 * M^{1.14} * (12 - MO) + 3.25 * (C_{soilstr} - 2) + 2.5(C_{perm} - 3)}{100}$$

Albedo Estimado a partir de materia orgánica<sup>4</sup>

1. INEGI, 2. Saxton, *et al.*, (1986), 3. Neitsch, *et al.*, (2005), 4. Ecuación de Harris (software Curve Expert 2.0). USLE\_K: Factor "K" de la ecuación universal de la pérdida de suelo.

### Cuadro 5. Perfil típico del suelo Cambisol calcarico

HORIZONTE	PROF.	TEXT.	D.A.	H. D.	C.O.	C.H.S.	C.R.	ALBEDO	USLE K	C.E
A	153	28-30-42	1.37	0.13	3.36	4.1	0	0.05	0.18	1
B1	362	28-31-41	1.36	0.13	1.76	3.9	0	0.1	0.26	1
B2	455	25-37-38	1.37	0.14	0.41	5.6	0	0.2	0.26	1

Prof.: Profundidad en mm, Text.: textura en porcentajes de suelo total y en el siguiente orden arcilla-limo-arena, D.A.: Densidad aparente en g cm<sup>-3</sup>, H.D.: Humedad disponible en mm mm<sup>-1</sup>, C.O.: Carbono orgánico en porcentaje de suelo total, C.H.S.: Conductividad hidráulica saturada en mm hr<sup>-1</sup>, C.R.: Contenido de rocas en porcentaje de suelo total, Alb: Albedo a dimensional, USLE K: Factor "K" de la ecuación universal de pérdida de suelo, C.E.: Conductividad eléctrica en dS m<sup>-1</sup>.

#### 3.2.3.2. Parámetros fisiológicos del cultivo de yuca.

Como este modelo no contenía ningún tipo de información sobre los parámetros de este cultivo, fue necesario la creación de esta base de datos adecuada a las características del estado, y posteriormente introducir estos datos al programa ArcSWAT para que se pudiera determinar la simulación y el rendimiento de este cultivo, toda esta información fue creada a través de diferentes fuentes de información (Artículos, revistas e internet), por el Dr. Jesús Uresti Gil.

### 3.2.3.3. Estaciones y datos climáticos.

El estado de Veracruz cuenta con 322 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el estado así que para la información climática requerida por el programa trabajó a partir de datos diarios de sólo 137 estaciones climatológicas, estas estaciones contaban con datos de precipitación pluvial, temperatura máxima y mínima de al menos 20 años durante el periodo 1960-2000. Con esta información y usando el generador climático del modelo EPIC se simularon los datos faltantes para el periodo 1960-2010 de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación pluvial; así como todos los de radiación solar y humedad relativa, además se obtuvieron los datos estadísticos requeridos por SWAT. El anexo 1 se presentan a manera de ejemplo los datos estadísticos para la estación 30077. Sin embargo debido a que el modelo asigna a la cuenca el clima de la estación más cercana a su centroide no todas las estaciones trabajadas fueron utilizadas por el programa, solo utilizo las 95 estaciones más representativas como se muestra en la Figura 9.

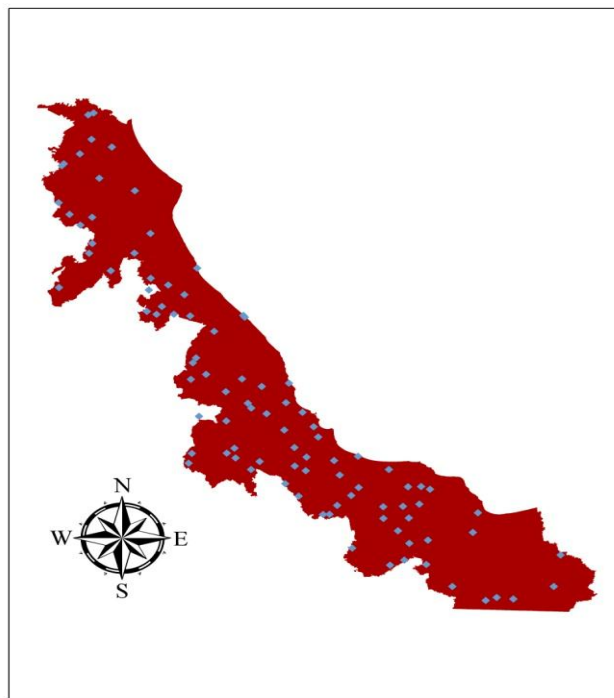


Figura 9. Distribución de las 95 estaciones usadas.

### 3.2.3.4. Practicas de manejo.

Se elaboró un manejo para el cultivo de yuca bajo condiciones de temporal como se muestra en el Cuadro 6, diseñado para obtener altos rendimientos; tomando en cuenta diferentes fuentes de información, que nos proporcionaban información adecuada a la región.

**Cuadro 6. Manejo del cultivo de yuca.**

ACTIVIDAD	FECHA	ACTIVIDAD	MANO DE OBRA	CANTIDAD	INSUMO	CANTIDAD DE INSUMO
<b>preparación del terreno</b>						
	15-abr	chapeo	servicio	1	----	----
<b>preparación del suelo</b>						
	01-may	Sub-soleo	servicio	1	----	----
	15-may	barbecho	servicio	1	----	----
	25-may	rastra	servicio	1	----	----
	26-may	rastra cruzada	servicio	1	-----	----
	31-may	surcado	servicio	1	----	----
<b>establecimiento del cultivo</b>						
	01-jun	siembra	jornales	12	----	-----
<b>fertilización</b>						
	30-jun	1era. fertilización	jornales	3	64-46-30(kg)	100
	31-jul	2da. fertilización	jornales	3	46-00-30 (kg)	100
<b>control de malezas</b>						
	03-jun	Pre-emergente	jornales	3	ametrina(kg)	3
	31-ago	post-emergente	jornales	3	Paracuat (lit.)	2

**control de plagas**

25-may	control de plagas al suelo	jornales	1	carbarilo(kg)	30
30-jun	control de plagas al follaje	jornales	2	carbarilo (kg)	1
31-jul	2do.control de plagas al follaje	jornales	2	cypermetrina(kg)	0.5

**control de enfermedades**

20-jul	1er.control de fungicidas	jornales	2	Mancozeb (g/lit.)	2
1-ago	2do.control de fungicidas	jornales	2	Mancozeb (g/lit.)	2

**Pre-cosecha**

11-may	poda de tallos	jornales	1	—	—
--------	----------------	----------	---	---	---

**cosecha**

30-may	desentierro mecánico	jornales	1	—	—
31-may	levante-acarreo	jornales	8	—	—

Debido a que no todos los fertilizantes se encontraban en la base de datos del programa algunos fueron añadidos realizando los cálculos correspondientes de su contenido de nitrógeno (N) y fosforo (P); el potasio (K) no es considerado por el modelo.

**3.2.3.5. Catálogos.**

Se elaboraron cuatro catálogos uno de ellos para relacionar el mapa de suelos con las características de cada clase y los otros tres para indicarle al modelo que

información climática (estadísticas mensuales, precipitación y temperatura máxima-mínima) usar.

### **3.3. PROCEDIMIENTOS DE SIMULACIÓN**

#### **3.3.1. Generalidades.**

El cálculo del rendimiento del potencial de producción del cultivo de yuca se realizó simulando y cartografiando la superficie total del estado de Veracruz considerando una superficie de 7.8 millones de hectáreas.

#### **3.3.2. Delimitación de cuencas y subcuencas.**

El programa ArcSWAT trabaja a nivel de cuenca. Por lo tanto se delimito todo el estado de Veracruz como tal a partir del DEM, Se definieron las cuencas, mediante la interpretación por medio del ArcSWAT de un DEM. Posteriormente dichas cuencas fueron acotadas a los límites del estado de Veracruz mediante ArcView 3.2 utilizando un mapa tipo mascara, con esta información el programa ArcSWAT calculó el flujo de los escurrimientos. Posteriormente dentro de las aplicaciones del programa se definieron manualmente las salidas de la cuenca con la cual el programa delimitó 224 sub-cuencas.

#### **3.3.3. Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH).**

Las unidades de respuesta hidrológica las generó el SWAT a partir de la sobre posición de los mapas a) De rango de pendiente (0-3, 3-8, 8-15, 15-30 y >30%) (Figura 6). Para la delimitación de las áreas con cada tipo de pendiente SWAT utilizó el DEM; b) De edafología (Figura 7); c) De uso de suelos (Figura 8) .El programa genero 4,053 URH que obedecen a una porción del terreno que pertenece a una subcuenca y comparten un uso de suelo, edafología y pendiente, por lo que presentan una respuesta similar a fenómenos hídricos y de crecimiento de cultivos.

#### **3.3.4. Asignación de parámetros climáticos y manejo del cultivo de yuca.**

Se incorporaron al modelo los archivos de datos diarios de temperatura y precipitación de las 95 estaciones climáticas generadas con anterioridad, además de añadir los catálogos correspondientes. Posteriormente se asignó un manejo general para el cultivo de yuca en la base de datos de SWAT, asumiendo un solo uso de suelos para todo el estado.

#### **3.3.5. Simulación y cartografía de resultados.**

El modelo se corrió una vez introducidos todos los archivos requeridos por ArcSWAT, realizando varias pruebas de sensibilidad para obtener el resultado optimo para el rendimiento del cultivo de maíz. El periodo de simulación fue del 2000-2010 obteniendo un archivo con datos promedio del rendimiento del cultivo de yuca por URH. Posteriormente se asigno un intervalo de rendimiento para cada URH en el mapa de resultados.



## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO DE YUCA.**

Se identifico y estudio el cultivo de yuca que en su tubérculo produce almidón como insumo bioenergético. En el Cuadro 7, se muestran las estadísticas generales de la superficie cultivada, bajo las condiciones de temporal en el estado de Veracruz durante el período 2001-2009; y el rendimiento promedio actual y potencial por unidad de superficie del producto económicamente importante (tubérculo), de los residuos de cosecha, de la biomasa seca total y el rendimiento potencial de etanol de primera generación. Como se puede observar la superficie cultivada es mínima con bajo rendimiento, aproximadamente el 30% del rendimiento potencial estimado, lo que sugiere que en Veracruz, este tubérculo es cultivado por pequeños productores, principalmente para el autoconsumo. Sin embargo, en la zona tropical se presentan condiciones favorables para obtener alto rendimiento en el cultivo de yuca. El cultivo de yuca es un buen candidato para producir etanol de primera y segunda generación ya que presenta ligeramente mayor contenido de almidón y materia seca (Cuadro 7 y 8), además es un cultivo que se desarrolla en todo tipo de suelo.

**Cuadro 7. Estadísticas generales de producción promedio (2001-2009) y producción potencial esperada bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz del cultivo de yuca.**

Indicador	Yuca	
Superficie sembrada (x1000 has.)	0.08	
Superficie cosechada (x1000 has.)	0.08	
Rendimiento de tubérculo Fresco (t ha <sup>-1</sup> )	Actual	12.0
	Potencial	40
Rendimiento de tubérculo seco (t ha <sup>-1</sup> )	Promedio actual	4.8
	Potencial	16
Rendimiento de almidón(kg t <sup>-1</sup> de tubérculo seco)	Promedio actual	800
	Potencial	4.8
Rendimiento de residuos de cosecha (t ha <sup>-1</sup> ) base seca.	Promedio actual	16
	Potencial	9.6
Rendimiento total de biomasa seca aérea (t ha <sup>-1</sup> )	Promedio actual	32
	Potencial	6,800
Rendimiento potencial de etanol de primera generación (L ha <sup>-1</sup> )	6,800	

**Cuadro 8. Composición química del tubérculo de yuca, y su tasa de conversión a etanol de primera generación (1G).**

componentes	Yuca	
Humedad del tubérculo fresco (%)	60	
Materia seca del tubérculo fresco (%)	40	
Almidón (%)	80	
Azúcar total (% del producto)	90	
Glucosa (% con relación a azúcar total)	93	
Maltosa (% con relación a azúcar total)	5	
Dextrosa (% con relación a azúcar total)	2	
Tasa de conversión tubérculo-etanol (L t <sup>-1</sup> de tubérculo)	Base fresca	170
	Base seca	425

El Cuadro 9 muestra los valores promedio típicos de la composición de los co-productos resultantes del proceso industrial para la producción de etanol a partir del almidón en el tubérculo de la yuca. Esta especie produce como co-producto harina en proporciones y contenidos de materia seca similares. La harina de la yuca presenta menos proteína cruda.

El bióxido de carbono es otro co-producto que se obtiene de la producción industrial de etanol. El volumen del gas producido en esta especie tiene un promedio de 40% sobre el volumen de etanol producido. Las vinazas son otro co-producto que se producen en pequeñas cantidades durante el proceso industrial para producir etanol, son ricas en nutrientes, por lo que pueden utilizarse como bio fertilizante.

**Cuadro 9. Valores promedio típicos de la composición de los co-productos resultantes del proceso industrial para producir etanol a partir del almidón de yuca.**

<b>Características del Co-producto</b>	
Nombre del co-producto	Harina
Proporción del co-producto con relación a la materia prima procesada (%)	20
Materia seca (%)	90
Humedad (%)	10
Proteína cruda (%)	3.5
Grasas (%)	1.2
Fibra cruda (%)	8
Nitrógeno (%)	1.6
Fósforo (%)	0.11
Potasio (%)	0.3
Nombre del co-producto	CO <sub>2</sub>
Proporción por litro de etanol producido (%)	40

Los residuos de cosecha son la proporción de biomasa aérea dejada en campo una vez que el producto económicamente importante (tubérculo) fue cosechado. En este trabajo, la proporción de esta biomasa, se identifica como índice de residuos de cosecha; y se cuantifica como la diferencia, contra la unidad, del índice de cosecha. En el Cuadro 10 se muestra la proporción y composición química, en términos de los componentes celulares y sus respectivos azúcares, de los residuos de cosecha de la yuca su producción unitaria teórica de etanol de segunda generación.

Realizando una comparación entre los residuos de cosecha del cultivo de yuca y del camote, la yuca presenta mayor proporción de residuos de cosecha, también produce mayor cantidad de materia seca total, aunque el contenido de humedad sea mayor. La proporción de celulosa y lignina y el respectivo contenido de glucanes en los residuos de cosecha de ambos cultivos son similares, no así el contenido de hemicelulosa y xilanes, los cuales son mayores en la yuca. El rendimiento teórico de etanol de segunda generación, derivado del azúcar de seis carbonos (celulosa) es igual para la yuca y camote, mientras que la cantidad de etanol derivado del azúcar de cinco carbonos (hemicelulosa) es mayor para la yuca.

**Cuadro 10. Composición promedio típica de los residuos de cosecha del cultivo de yuca.**

<b>Componentes</b>	<b>Yuca</b>	
Índice de residuos de cosecha	0.50	
Contenido de humedad en residuos de cosecha (%)	86	
Componentes celulares (% de materia seca)	Celulosa	37
	Hemicelulosa	25
	Lignina	27
	Glucan	37
Azúcares de 6-Carbonos (% de materia seca )	Galactan	0.5
	Manosan	0.33

Azúcares de 5-Carbonos (% de materia seca)	Xilan	25
	Arabinan	1.17
Etanol de celulosa-azúcares de 6 carbonos (L t <sup>-1</sup> )		247
% del etanol 2G total		58
Etanol de hemicelulosa-azúcares de 5 carbonos (L t <sup>-1</sup> )		179
% del etanol 2G total		42
Total de etanol 2G (L t <sup>-1</sup> )		426

---

El Cuadro 11 se muestra el uso actual y potencial en México del producto económicamente importante, co-productos y residuos de cosecha de la yuca. El producto económicamente importante (tubérculo) o insumo bio-energético del cultivo, puede usarse para la alimentación humana y animal; y producir etanol de primera generación. La harina, debido a su alto valor nutritivo, debe usarse principalmente para la alimentación de ganado y contribuir con la producción de carne y seguridad alimentaria.

El CO<sub>2</sub> y las vinazas producidas, pueden tener diversos usos en la industria. En la agricultura protegida el CO<sub>2</sub> puede usarse como fertilizante para optimizar el rendimiento de cultivos hortícolas con alto valor económico. Las vinazas pueden utilizarse en la agricultura como bio-fertilizante mejorador del suelo.

Los residuos de cosecha de la yuca pueden utilizarse como alimento para ganado, como mejoradores del suelo, y para producir etanol de segunda generación.

**Cuadro 11. Uso actual y potencial en México de los productos económicamente importantes, co-productos y residuos de cosecha de la yuca.**

Nombre del producto/ Insumo bioenergético		Uso actual/ potencial para	Cultivo
Genérico	Específico		Yuca
Producto económicamente importante	Tubérculo	Alimento humano	✓
		Alimento animal	✓
		Etanol 1G	✓
	Harinas	Alimento humano	-
		Alimento animal	✓
Co-productos	CO <sub>2</sub>	Generación de energía	-
		Mejorador de suelo	-
		Etanol 2G	-
	Celulosa y Hemicelulosa	Industria	✓
		Agricultura	✓
Residuos de cosecha	Celulosa y Hemicelulosa	Alimento animal	✓
		Generación de energía	-
		Mejorador de suelo	✓
		Etanol 2G	✓

#### 4.2. CARTOGRAFÍA DEL RENDIMIENTO

En el rendimiento del cultivo de yuca está altamente influenciado por parámetros edáficos y climáticos mostrándose una variabilidad de rendimientos desde 0 a 35 t/ha, en la Figura 10 se muestra esa variación potencial y marginal de yuca en el estado de Veracruz.

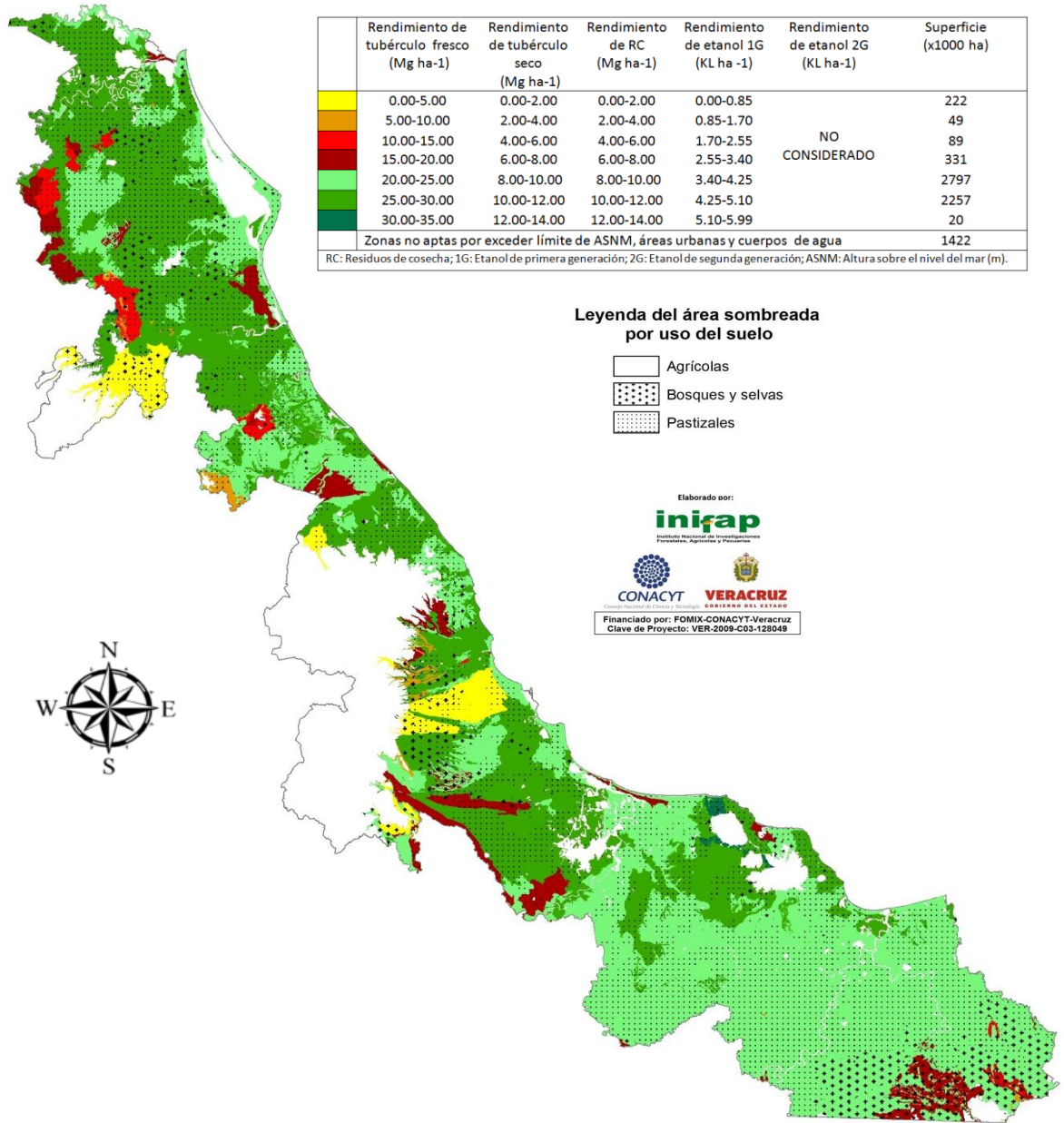


Figura 10. Mapa de rendimientos del cultivo de yuca.

De las 7.187 millones de hectáreas del estado de Veracruz solo 5.765 millones de hectáreas son aptas según la modelación descartando 1.422 millones de hectáreas por estar ocupadas por áreas urbanas, cuerpos de agua y/o presentar elevaciones > 1800 msnm que afectan el rendimiento del cultivo.

Observando los resultados obtenidos del cultivo de yuca (figura 10), para la conversión del tubérculo a etanol, se obtiene un rendimiento máximo potencial de 35 t/ha<sup>-1</sup> que equivale a 5,990 l/ha de etanol de primera generación.

Los bajos rendimientos del tubérculo fresco de yuca (0-20 t/ha<sup>-1</sup>) ocupan la menor superficie del estado de Veracruz que equivale a 691 millones de hectáreas, mientras que los altos rendimientos (20-30 t/ha<sup>-1</sup>) ocupan la mayor superficie con 5,054 millones de hectáreas, aunque el excelente rendimiento (30-35 t/ha<sup>-1</sup>) representa una pequeña superficie equiválete a 20 millones de hectáreas, razón que indica al cultivo de yuca como un gran potencial de producción en la región.

#### **4.3. ANÁLISIS DE FACTORES**

Se utilizaron los mapas de profundidad, textura, M.O., temperatura, radiación y precipitación (anexo 2 al 7) para buscar correlaciones entre los rendimientos del cultivo, generados en el mapa (Figura 10).

Se observaron óptimos rendimientos con radiación y temperatura media, aunque con una deficiente precipitación, en suelos profundos con textura arcillosa con un contenido de materia orgánica bajo. Por lo tanto el rendimiento del cultivo se vio afectado cuando algunos o todos los parámetros no presentaban las condiciones óptimas requeridas por el cultivo. Por otro lado la radiación si es significativa ya que a medida que está disminuye existen óptimos rendimientos.

De acuerdo a la correlación de los 6 parámetros a evaluar se observó que para obtener altos rendimientos un solo factor negativo no es suficiente para que el



rendimiento descienda (Cuadro 12). Para determinar el rendimiento del cultivo la materia orgánica, no es un factor representativo para caracterizar los malos o buenos rendimientos.

**Cuadro 12. Ejemplo de URH afectadas por variables climáticas y edáficas.**

Radiación	Temp.	Precipitación	Profundidad	Textura	M.O	Rendimiento (mg.ha <sup>-1</sup> )
Alta	Media	Media	Profundos	Arena-F	Baja	0-5 <sup>(a)</sup>
Media	Media	Buena	Muy profundos	Arcilloso	Alta	5-10 <sup>(b)</sup>
Media	Media	Media	Delgados	Arcilloso	Baja	10-15 <sup>(c)</sup>
Media	Media	Excesiva	Someros	Arcilloso	Alta	15-20 <sup>(d)</sup>
Media	Media	Buena	Profundos	Franco-A-A	Alta	20-25 <sup>(e)</sup>
Media	Media	Deficiente	Muy profundos	Arcilloso	Baja	25-30 <sup>(f)</sup>
Baja	Media	Buena	Profundos	Arena-F	Alta	30-35 <sup>(g)</sup>

(a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) ver anexo 8.

Con el fin de conocer la superficie total disponible para la producción del cultivo de yuca como insumo para bioetanol y no afectar la seguridad alimentaria del estado se identificó el uso actual del suelo en: áreas agrícolas, bosques, selvas, cuerpos de agua y áreas urbanas (Figura 10) para no utilizar dichas áreas en la producción de yuca.

## 5. CONCLUSIONES

La caracterización del cultivo de yuca como materia prima para bioetanol en el estado de Veracruz presenta un elevado potencial de producción. Con un rendimiento máximo del tubérculo de  $35 \text{ t/ha}^{-1}$  equivalente a  $5,990 \text{ l/ha}$  de etanol de primera generación.

El cultivo de yuca como insumo para bioenergéticos tiene buen rendimiento potencial de etanol de primera generación por su alto contenido de almidón en el tubérculo.

El rendimiento del cultivo estuvo fuertemente influenciado por los parámetros climáticos y edáficos, principalmente por la radiación ya que a medida que esta va disminuyendo los rendimientos aumentan considerablemente, este factor fue dominante con respecto a la precipitación, profundidad y textura cambiante observada en el mapa de rendimientos (figura 10).

El parámetro que no mostró ninguna sensibilidad en el rendimiento del cultivo fue la temperatura, atribuyéndole este hecho a que los mejores rendimientos estuvieron presentes en precipitación deficiente, y suelos arcillosos con materia orgánica baja.

Los mejores rendimientos del cultivo de yuca se registraron en áreas con radiación baja, precipitación buena, suelos profundos con textura arena franca y contenido de materia orgánica alta.

## 6. LITERATURA CONSULTADA

- Alarcón, Aurea, V. 2010. Producción de bioetanol con *Zymomonas mobilis*. Instituto politécnico Nacional. UPIBI. México, D.F.
- Arbiol, R., Pala, V., Pérez, F., Viña, M., Ascaso, E., Marturia, J., Oller, P., Roca, A., Carrillo, G., y García, J.F. 2001. Zonificación Agro-ecológica de Namibia a partir de Imágenes de Satélite. Barcelona.
- Arroyo, L.A., Araya, E.J. 2004. Zonificación agroecológica (ZAE) del limón mesino en la región pacífico central de Costa Rica. INTA.
- Ballesteros, G., Rodríguez, L. A., Zavala, F., Puche, F., Urieta, M., Ballesteros, N., y Flores, L. 2010. La yuca (*Manihot esculenta Crantz*), cultivo promisorio para Guerrero. Manual técnico No.1. Instituto tecnológico de Cd. Altamirano., Fundación produce de Guerrero.
- Barba, M. 2007. Producción de Biodiesel, Una oportunidad para Bolivia. Foro: ¿Por qué debería Bolivia apostar por los Biocombustibles?, La Paz-Bolivia.
- Carreón, O.E., Ramos, A.S., Centeno, S., Leal, L.J., Martínez, A., Fernández, M.T. 2009. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Vol.13 No.3. Cuernavaca, Mor.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2008. Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe. Coviello, M.F., Gómez, J.J., Razo, C., Rodríguez, A.
- Cock, J.H. 1989. La yuca, nuevo potencial para un cultivo tradicional. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali Colombia.
- Devic, Y. A. 2001. Desarrollo de una metodología basada en un SIG 3D para evaluación de sitios contaminados: un enfoque de caso. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey N.L.
- Diario Oficial de la Federación 2008. Ley de Desarrollo y Promoción de los Bioenergéticos. México.
- Domínguez, C.A. 2008. Análisis económico costo-beneficio del etanol en México. Tijuana, B.C.

- Dufey, A. 2006. Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sostenible: los grandes temas. Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo. Londres.
- Estado de Veracruz. 2009. Monografía.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1996. Adaptación de la metodología de zonificación agroecológica de la FAO para aplicaciones a diferentes niveles de zonificación en países de América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
- FAO. 2008. Conferencia de alto nivel sobre la seguridad alimentaria mundial, y aumento de los precios de los alimentos. Roma.
- FAO. 1997. Zonificación agro-ecológica. Boletín de Suelos de la FAO 73.
- FAO. 2009. Evolución de producción de biocombustibles, mercados y la seguridad alimentaria. Análisis-IBEPA journal, vol.1, N°3.
- Galván, I., Fernández de Villarán, R., Domingo-Santos, J.M. 2007. Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del río Meca (Huelva, España). *Geogaceta* 42, pp.63-66.
- García, J.M. y García, J.A. 2006. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. Informe de vigilancia tecnológica. Circulo de innovación en tecnologías medioambientales y energía.
- Gazzoni, D.L. 2009. Biocombustibles y alimentos en América Latina y el Caribe. San José, Costa Rica .IICA.
- Gobierno del estado de Veracruz. 2010. Monografía de la yuca.
- Goldstein, E., Gutman, G. 2010. Biocombustibles y bioetanol. Contexto internacional, situación en Argentina. CEUR-CONICET.
- Hernández, E. 2008. Estudio comparativo de la legislación latinoamericana sobre biocombustibles. Servicio holandés de cooperación al desarrollo SNV. Honduras
- Hilbert, J.A. 2008. Sustentabilidad de biocombustibles reunión preparatoria. cop 9 Vilme Alemania. INTA.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2007a. Atlas de la agro energía y los biocombustibles en las Américas: 1. Etanol. San José, C.R.

- IICA. 2007b. Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. San José, C.R.
- IICA. 2010. América Latina y el Caribe. Mapeo político-institucional y análisis de la competencia entre producción de alimentos y bioenergía. San José, C.R.
- James, C.St.2009. La Argentina y los biocombustibles de segunda y tercera generación. Cámara Argentina de Energías Renovables.
- Lardizábal, R. (2002, 2009).Manual de producción de yuca valencia. MCA-Honduras/EDA.
- Mena, U. 2007. Aplicación de las Sistemas de Información Geográfica en la ingeniería civil. Boletín IIE.
- Merino, P.A. y Nonay, T. 2009. Descripción, Evolución y retos del sector de los biocombustibles. Boletín tecnológico de ICE N° 2971.
- Ochoa, L. del R. 2003.Sistemas de Información Geográfica, ventajas y desventajas de su utilización en Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oñate, F., Aguilar, G. 2003. Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. Universidad Técnica particular de Loja. Ecuador.
- Peña, J. 2006. Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio, Revista de Geografía Norte Grande, N°36, pp.97-101.Universidad Católica de Chile.
- SAGARPA (Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación; SIAP (Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera) situación actual y perspectiva de yuca en México 1996-2012.MX.
- Salinas, E., Gasca, V. 2009.los biocombustibles. El cotidiano, vol.24, num.157, septiembre-octubre, pp.75-82. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México. Red de revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
- Tapia, M.E. 1997. Curso-taller. Manejo integral de micro-cuencas. Lima, Perú.
- Tinoco, C., Rodríguez, M., Sandoval, R., Barrón, F., Palafox, C., Esqueda E., Sierra M., Romero M. 2002.Manual de producción de maíz para los

estados de Veracruz y Tabasco. INIFAP.CIRGOC. Campo Experimental Papaloapan. Libro técnico num.9, México.

[titulaciongeografia-sevilla.es/web/contenidos/.../IntroduccionArGISBP.pdf](http://titulaciongeografia-sevilla.es/web/contenidos/.../IntroduccionArGISBP.pdf).

Torres y Carrera. Consultores de comunicación. 2010. Informe biocombustibles. Madrid, España.

Torres, E., Fernández, D.S., Oropeza-Mota, J.L., Mejía, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "el Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *TERRA latinoamericana*, vol.2, núm. 4, pp. 437-444. Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Torres, E., Mejía, E., Cortes, J., Palacios, E., Exebio, A. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológico a la cuenca del río la Laja, Guanajuato, México. *Agro ciencia* vol. 39, núm. 005, pp. 481-490. Colegio de Postgraduados Texcoco, México.

UAM, (Universidad Autónoma Metropolitana). 2011. En 20 años México agotará sus reservas de petróleo. *Universia*, México.

Uribe, N., Quitero, M. 2011. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la cuenca de río Cañate (SWAT). Centro Internacional de Agricultura Tropical. Colombia.

Vicente, J.L., Behm, V. 2008. Consulta, edición y análisis espacial con ArcGIS 9.2. Tomo I: teoría.

[www.funprover.org/agroentorno/septiembre/Yuca.pdf](http://www.funprover.org/agroentorno/septiembre/Yuca.pdf)

[www.geoinfo.cl/pdf/Curso\\_ArcView.pdf](http://www.geoinfo.cl/pdf/Curso_ArcView.pdf).

[www.oeidrusveracruz.gob.mx](http://www.oeidrusveracruz.gob.mx).

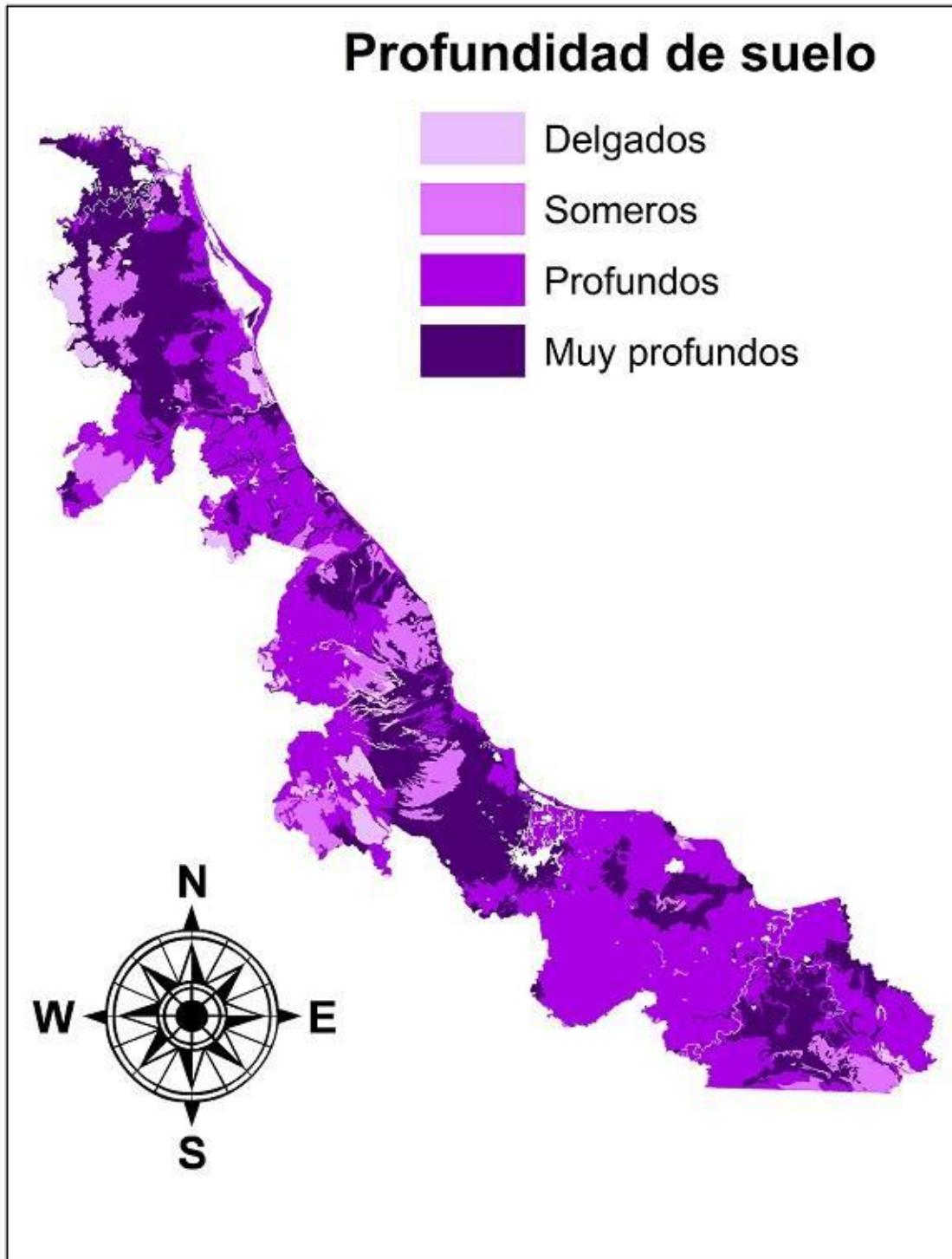
## 7. ANEXOS

### Anexo 1. Datos estadísticos de la estación meteorológica 30077.

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	Julio	Agosto.	Septiembre	octubre	Noviembre	Diciembre
Tmax	26.5	28.7	32.6	35.6	36.9	34.8	32.7	33.1	32.3	30.6	29.2	27.1
Tmin	18.1	18.6	20.5	22.6	24.3	24	23.3	23.3	23	21.9	20.6	19
DETmax	4	4.8	4.9	4.3	3.4	3.6	3.1	3	3.4	3.9	3.7	3.7
DETmin	2.3	2.5	2.6	2.3	1.9	1.6	1.4	1.3	1.3	1.9	2.1	2.4
PPM	53.3	28.9	21.6	21.8	53.6	258	278.4	341	350.6	229.6	120.2	99.1
DEPPM	11.48	13.44	15.48	9.37	23.39	21.4	21.64	20.29	27.36	21.77	17.77	15.99
CAPPM	2.517	4.562	5.007	1.395	2.241	2.096	4.309	2.56	2.692	2.886	3.034	2.387
PDHDS	0.127	0.087	0.055	0.055	0.072	0.291	0.351	0.427	0.361	0.27	0.183	0.18
P DHDH	0.37	0.296	0.277	0.235	0.235	0.551	0.621	0.673	0.618	0.544	0.49	0.416
PDPM	5.2	3.1	2.2	2	2.7	11.8	14.9	17.5	14.6	11.5	7.9	7.3
PMMH	18.5	19	19.5	21.7	46.9	46.7	38.4	40.7	47.6	37.7	28.8	24.6
RS	12	15	19	21	22	20	19	19	18	16	14	13

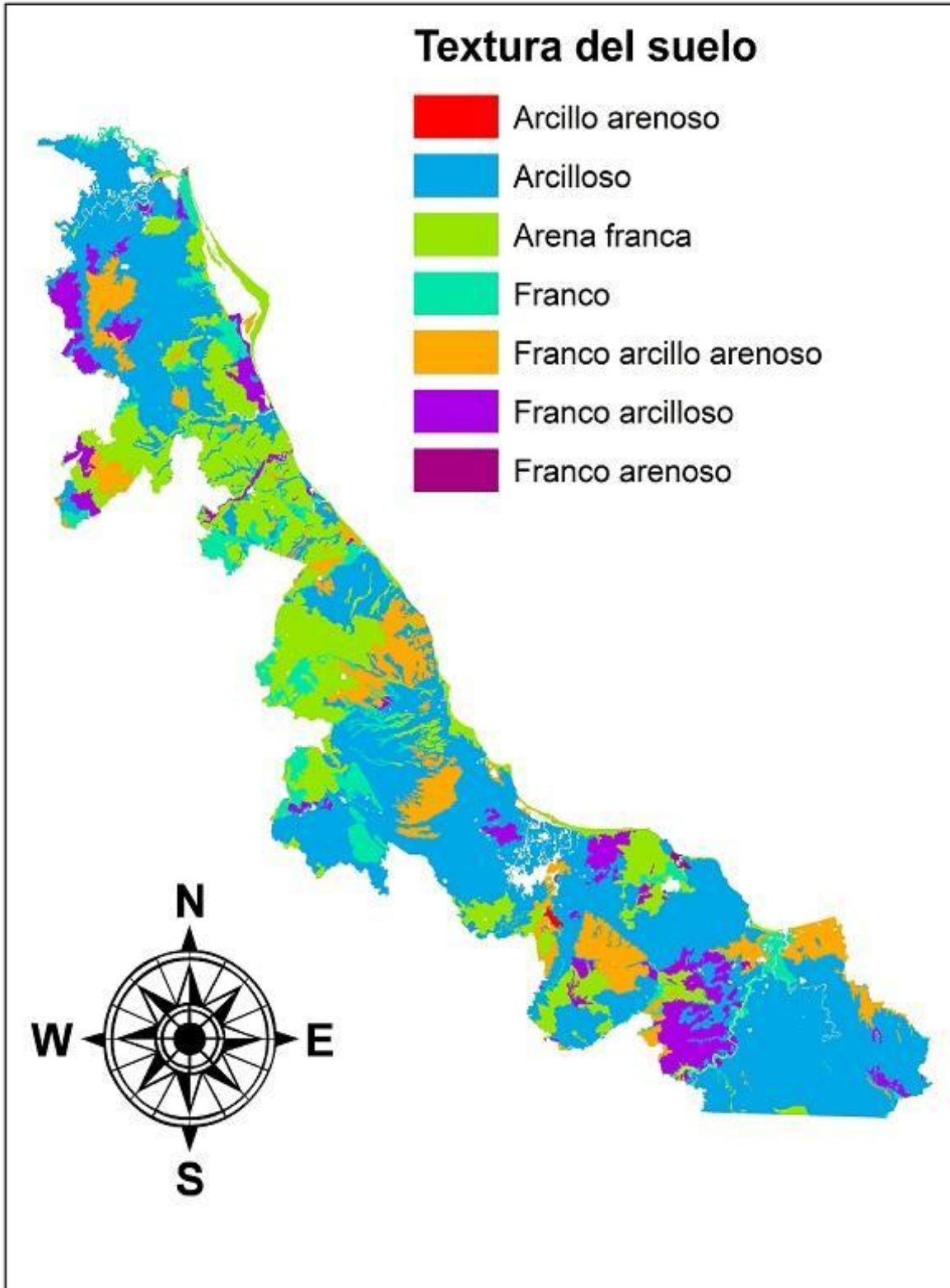
Tmax: Temperatura máxima; Tmin: Temperatura mínima; DETmax: Desviación estándar de la temperatura máxima; DETmin: Desviación estándar de la temperatura mínima; PPM: Precipitación promedio mensual; DEPPM: Desviación estándar de la precipitación promedio mensual; CAPPM: Coeficiente de asimetría de la precipitación promedio mensual; PDHDS: probabilidad de un día húmedo después de un día seco; PDHDH: probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo; PDM: Promedio de días con precipitación al mes; PMMH: Precipitación máxima en media hora; RS: Radiación solar

Anexo 2. Clasificación por profundidad del estado de Veracruz.

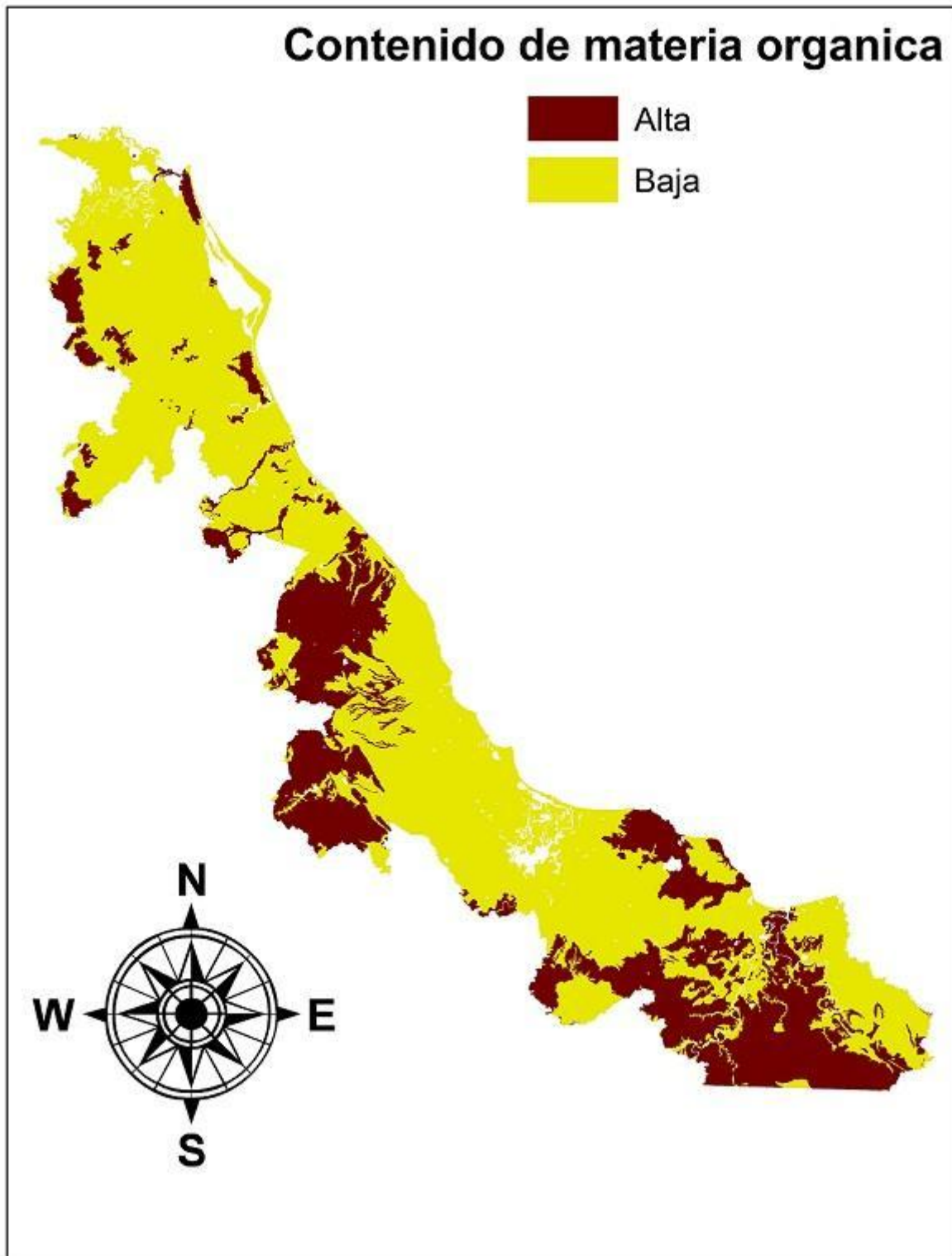




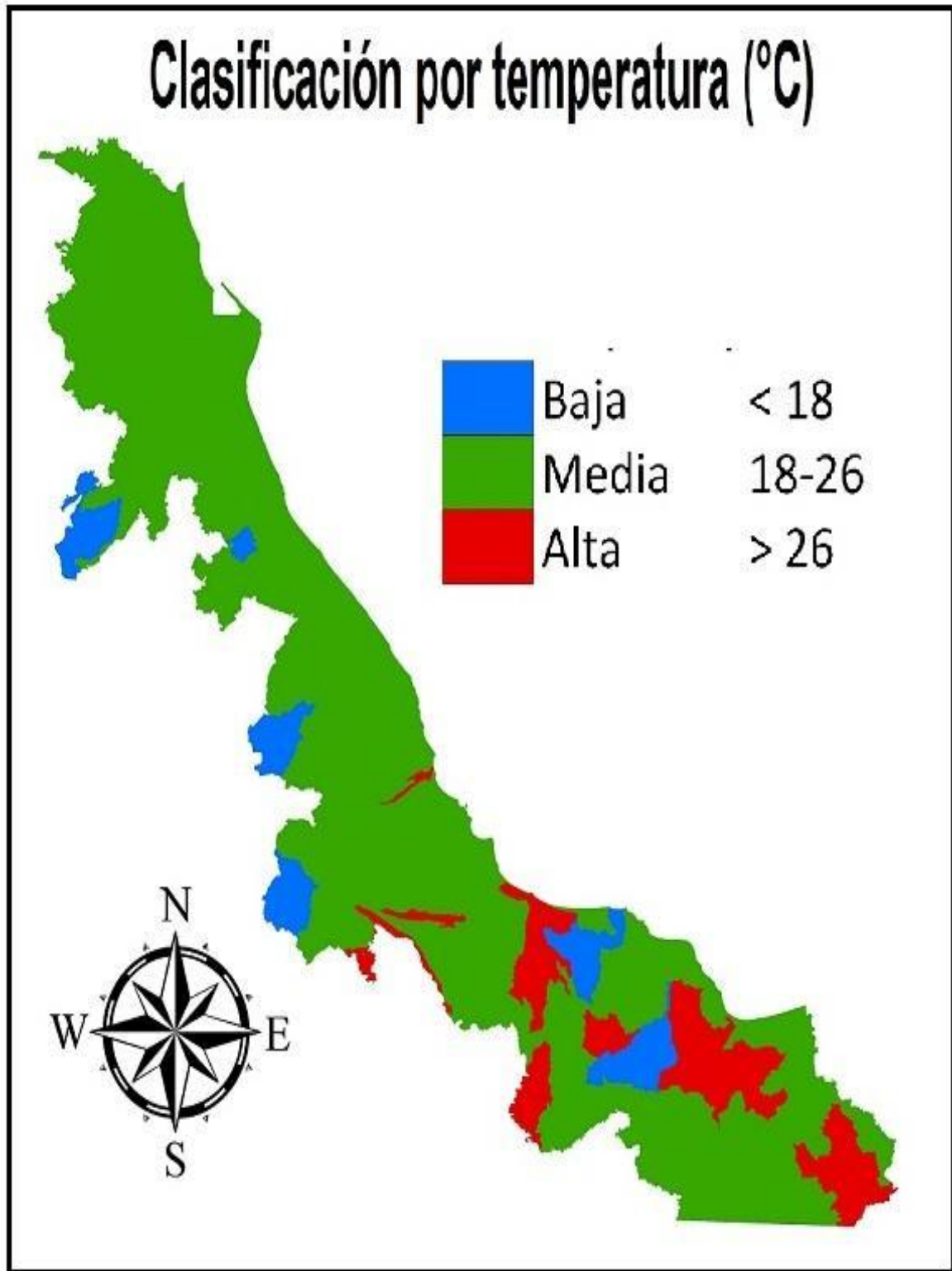
Anexo 3. Clasificación por textura de suelo del estado de Veracruz.



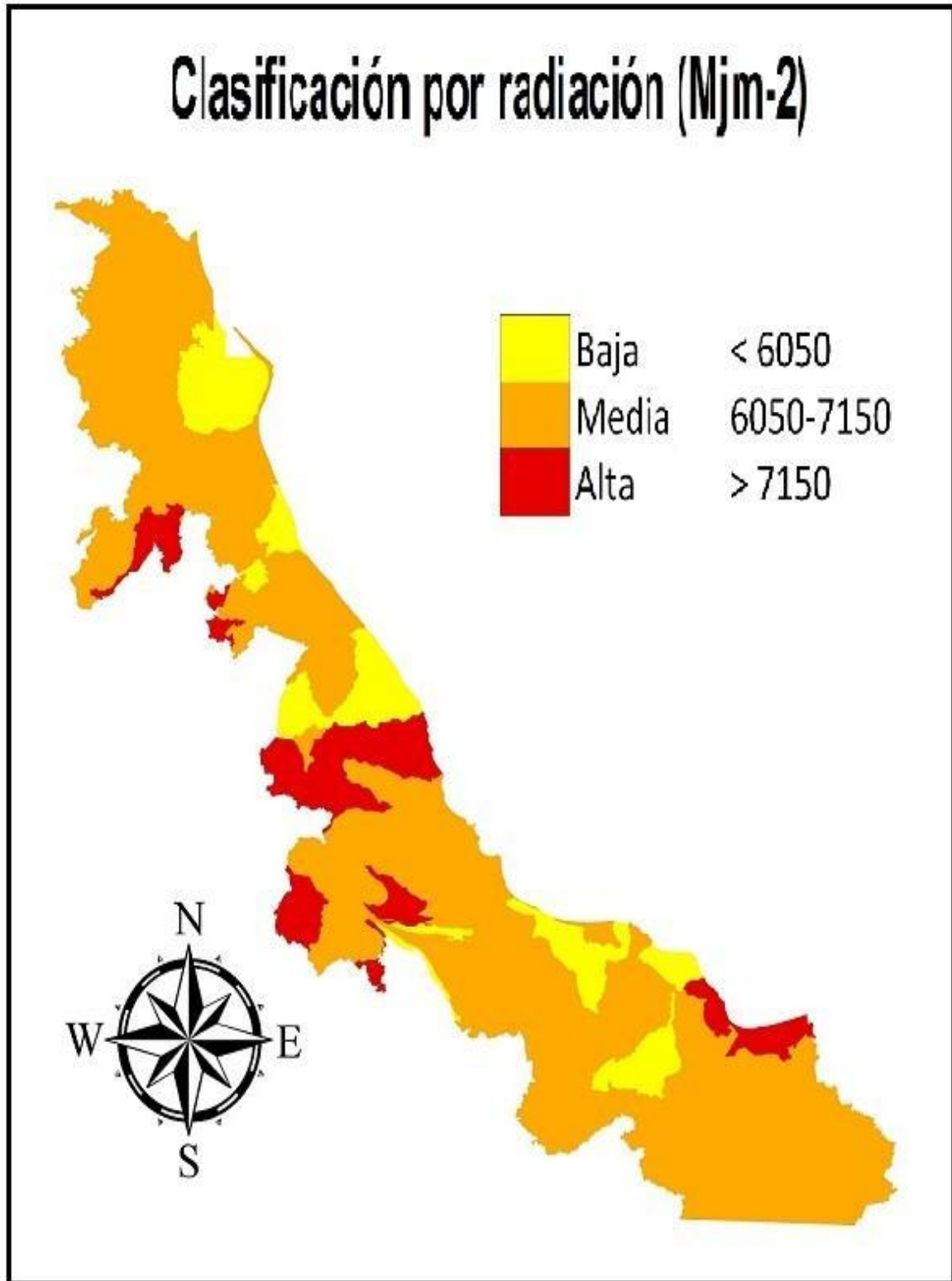
Anexo 4. Clasificación por contenido de M.O. en el suelo del estado de Veracruz.



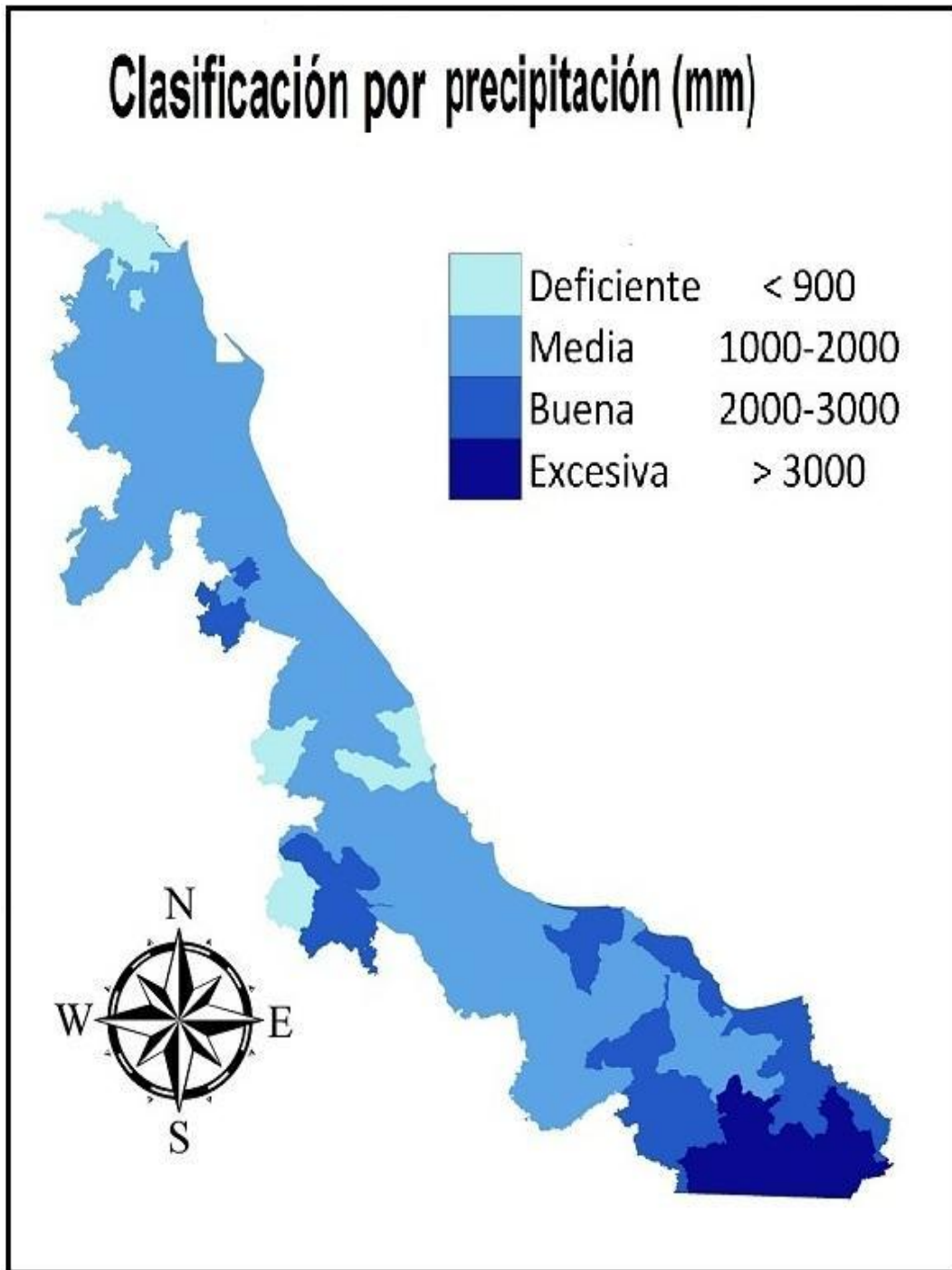
Anexo 5. Clasificación por temperatura del estado de Veracruz.



Anexo 6. Clasificación por radiación del estado de Veracruz.



Anexo 7. Clasificación por precipitación del estado de Veracruz.



Anexo 8. Ejemplo de URH afectadas por parámetros climáticos y edáficos.

