

# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**División de Ingeniería  
Departamento de Ciencias del Suelo**



**Caracterización del cultivo de maíz y cartografía de su potencial  
productivo para producir bioetanol en el estado de Veracruz**

**Por:**

**ARACELI ALTUNAR HERNANDEZ**

**TESIS**

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

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Octubre de 2011**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"

DIVISIÓN DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO


CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO DE MAÍZ Y CARTOGRAFÍA DE SU  
POTENCIAL PRODUCTIVO PARA PRODUCIR BIOETANOL EN EL ESTADO  
DE VERACRUZ

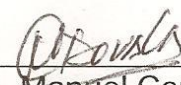
TESIS POR:

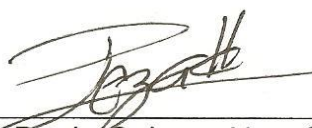
ARACELI ALTUNAR HERNANDEZ

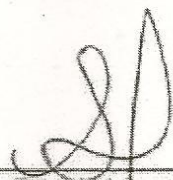
Que se somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito para  
obtener el título:

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

  
Dr. J. Jesús Rodríguez Sahagún  
Presidente del Jurado


  
M.C. J. Manuel Cepeda Dovala  
Sinodal

  
M.C. Paola C. Leza Hernández  
Sinodal

  
Ing. H. Daniel Inurreta Aguirre  
Sinodal

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"

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

  
Coordinación de  
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2011

## DEDICATORIA

*La vida suele ser muy impredecible, nunca sabes lo que viene, simplemente puedes pensar en el mañana y no saber qué pasará, sin embargo pensar en el pasado es mirar hacia atrás y lo que haya pasado entonces es irremediable, dar un paso atrás ya no es posible, así que el mañana es un regalo y una bendición porque significa que hay una oportunidad, lo sé porque DIOS me ha regalado el derecho a la vida y por ello gracias mi Dios.*

*Por mi madre Enequina Hernández Alt. y para mi padre Anastasio Altunar Alt. las personas que más admiro en esta vida... los amo, a mis hermanos Roque, Adela, Lila, Lupita, Saúl que desde los recuerdos más lejanos hasta hoy han sido mi motor, razón de ser e inspiración, gracias a ustedes estoy de pie ahora y lo seguiré estando siempre, por ustedes y para ustedes "FAMILIA ALTUNAR HERNANDEZ" los amo. A mis bebés Alex, Julián, Bruno, y la beba; a mis cuñados Mary, Javier, Adelfo y en especial a ti prima Luque, GRACIAS por estar siempre conmigo.*

*Hace poco alguien me pregunta ¿Qué quieres cambiar en tu vida?, la respuesta es muy simple, "NADA" en realidad tantas cosas me han pasado, que todo absolutamente todo me han convertido en lo que soy, bueno o malo siempre escogería el mismo camino, las mismas cosas y la misma vida, porque durante este tiempo los malos momentos siempre han estado por debajo de los buenos recuerdos, a todos los que estuvieron ahí para levantarme, para todos aquellos que me tendieron una mano en medio del desierto, para los que me distinguieron en medio de la multitud... GRACIAS por cruzarse en mi camino.*

*Siempre escogería a los mismos AMIGOS, por que en los momentos de crisis solo basta con hacer memoria y acordarme de ustedes para que en mi rostro se pinte una sonrisa y se escuche una carcajada, porque con ustedes más que una risa una carcajada era y es la melodía que alimenta mi alma.*

*Quisiera citar tantos nombres y hacer una reseña de cada uno de ellos pero en vez de eso, este escalón en mi vida está dedicada a ustedes.*

*Creo que la felicidad, la esperanza y los sueños son sentimientos y emociones que siempre están ahí para impulsarnos a seguir buscando ese algo que nos complementa, y eso no es algo que este clasificado para unos cuantos, porque al final todos estamos bajo un mismo cielo.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*Terminar la carrera y dejar de ser alumna para pasar a ser la Ing. Araceli Altunar Hernández, es un trabajo personal muy satisfactorio pero no hubiera sido posible sin la ayuda de mis profesores, 5 años fueron bastante largos sin embargo con la ayuda de todos y cada uno de ellos ese tiempo se redujo a aprendizaje y crecimiento profesional, por los conocimientos compartidos GRACIAS y por cobijarme entre tus aulas gracias UAAAN.*

*A mis asesores:*

*Doc. J. Jesús Rodríguez S.: por su voto de confianza en medio de tanto tumulto, gracias.*

*M.C. J. Manuel Cepeda D.: por su apoyo siempre firme, respeto y confianza, muchas gracias.*

*M.C. Paola C. Leza Hdez.: por la ayuda incondicional, confianza y amistad, gracias.*

*Ing. H. Daniel Inurreta Aguirre: por su paciencia, apoyo, ánimo y cooperación gracias*

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

## INDICE DE CONTENIDO

Pág.

<b>DEDICATORIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iii
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	iv
<b>INDICE DE CUADROS</b> .....	vii
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>INDICE DE ANEXOS</b> .....	ix
<b>RESUMEN</b> .....	x
<b>ABSTRAC</b> .....	xii
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.1.1. Objetivo general .....	3
1.1.2. Objetivo especifico .....	3
1.2. Hipótesis .....	4
1.2.1. Hipótesis general .....	4
1.2.2. Hipótesis especifico .....	4
<b>2. REVISION DE LITERATURA</b> .....	5
2.1. Biocombustibles .....	5
2.1.1. Características generales de los biocombustibles .....	5
2.1.2. Bioetanol de primera y segunda generación .....	6
2.1.3. Estadísticas de producción de biocombustibles .....	7
2.1.4. Rentabilidad de los biocombustibles .....	7
2.2. Factores que promueven la producción de los biocombustibles .....	8
2.2.1. El petróleo y la seguridad energética .....	8
2.2.2. Cambio climático y calentamiento global .....	9

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 maíz en Veracruz.....	13
2.3.1. Superficie cultivada de maíz.....	13
2.3.2. Paquete tecnológico y costos de producción del cultivo de maíz .....	15
2.4. Zonificación agroecológica .....	16
2.4.1. Conceptos generales .....	16
2.4.2. Zonificación utilizando sobre posición de mapas.....	16
2.5. El modelo SWAT .....	17
2.5.1. El modelo SWAT y la extensión ArcSWAT .....	17
2.5.2. Trabajo de cálculo de potencial productivo usando SWAT.....	18
2.6. Sistemas de información geográfica .....	19
2.6.1. Generalidades.....	19
2.6.2. ArcMap .....	20
<b>3. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. Área de trabajo.....	21
3.1.1. Ubicación geográfica del estado de Veracruz .....	21
3.1.2. Clima .....	22
3.1.3. Topografía.....	23
3.1.4. Suelo .....	23
3.1.5. Uso de suelo .....	24
3.1.6. Relación del clima, pendiente, tipo y uso de suelo .....	25
3.2. Requerimientos del modelo .....	26
3.2.1. Mapas .....	26

3.2.2. Base de datos y catálogos .....	27
3.2.2.1. Base de datos edafológicos .....	27
3.2.2.2. Parámetros fisiológicos del cultivo de maíz .....	29
3.2.2.3. Estaciones y datos climáticos .....	29
3.2.2.4. Practicas de manejo .....	30
3.2.2.5. Catálogos .....	32
3.3. Procedimientos de simulación .....	32
3.3.1. Delimitación de cuencas y subcuencas .....	32
3.3.2. Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica .....	33
3.3.3. Asignación de parámetros climáticos y manejo del cultivo de maíz.....	33
3.3.4. Simulación y cartografía de resultados .....	33
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSION .....</b>	<b>34</b>
<b>5. CONCLUSION .....</b>	<b>40</b>
<b>6. LITERATURA CONSULTADA.....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>47</b>



## INDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Datos de maíz en grano para el estado de Veracruz a diciembre de 2010 .....	14
Cuadro 2. Principales municipios de Veracruz por superficie sembrada de maíz de grano (Hectáreas) .....	14
Cuadro 3. Metodología y fuentes utilizadas para calcular los datos de suelo faltante .....	28
Cuadro 4. Características del perfil típico del suelo Cambisol Calcarico.....	28
Cuadro 5. Parámetros fisiológicos del maíz utilizados por SWAT .....	29
Cuadro 6. Manejo del cultivo de maíz bajo condiciones de temporal para el estado de Veracruz.....	31
Cuadro 7. Composición química del grano de maíz. ....	34
Cuadro 8. Composición promedio típica de los residuos de cosecha del cultivo de maíz...	35
Cuadro 9. Uso actual y potencial en México del grano, co-productos y residuos de cosecha del maíz.....	36
Cuadro 10. Ejemplo de URH afectadas por variables climáticas y edáficas.....	38

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización del estado de Veracruz .....	21
Figura 2. Climas del estado de Veracruz.....	22
Figura 3. Topografía del estado de Veracruz.....	23
Figura 4. Mapa de suelos del estado de Veracruz.....	24
Figura 5. Mapa de uso de suelo del estado de Veracruz.....	25
Figura 6. Distribución de las 95 estaciones meteorológicas .....	30
Figura 7. Mapa de rendimiento del cultivo de maíz.....	37

## INDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Datos estadísticos de la estación 30078 .....	48
Anexo 2. Clasificación de precipitación del estado de Veracruz .....	49
Anexo 3. Clasificación por radiación del estado de Veracruz .....	50
Anexo 4. Clasificación por temperatura del estado de Veracruz .....	51
Anexo 5. Clasificación por profundidad del estado de Veracruz. ....	52
Anexo 6. Clasificación por textura de suelo del estado de Veracruz .....	53
Anexo 7. Clasificación por contenido de M.O. en el suelo del estado de Veracruz .....	54
Anexo 8. Ejemplo de URH afectadas por parámetros climáticos y edáficos.....	55
Anexo 9. Uso actual del suelo.....	56

# **Caracterización del Cultivo de Maíz y Cartografía de su Potencial Productivo para Producir Bioetanol en el Estado de Veracruz**

**Por**

**Araceli Altunar Hernández**

## **RESUMEN**

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

Con la finalidad de conocer el potencial del cultivo de maíz como insumo para producir bioetanol en el estado de Veracruz 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 expreso en una zonificación con base en las variaciones del potencial de producción, utilizando modelos de simulación (SWAT) y sistemas de información geográfica (ArcGIS) que permitieron simular y cartografiar el rendimiento del cultivo de maíz de temporal en toda la superficie del estado en diferentes rangos de rendimiento.

Los rangos de rendimiento se correlacionaron con algunos parámetros climáticos (temperatura, precipitación y radiación) y edáficos (profundidad, textura, materia orgánica) observando una fuerte influencia entre la profundidad y textura del suelo en el rendimiento del cultivo con intervalos de variación climática.

Con respecto a los rendimientos obtenidos del cultivo, se realizo la conversión de biomasa fermentable (granos y residuos de cosecha) a etanol (1° y 2° generación) de acuerdo al rendimiento por ha<sup>-1</sup> de una zona marginal o potencial.

Determinando que el estado de Veracruz cuenta con una muy buena aptitud bioenergética utilizando maíz como materia prima.

# **Corn Crop Characterization and Mapping of its Productive Potential for Bioethanol Production in the State of Veracruz**

**By**

**Araceli Altunar Hernández**

## **SUMMARY**

**Keywords:** corn, bioethanol, characterization, zoning, mapping, performance.

With the purpose of to know the potential of the maize crop as an input to produce bioethanol in the state of Veracruz was first necessary to determine the capacity of the crop to produce bioethanol from biomass and after all know the potential yield in the state depending on the variation of climates and soils. The result was expressed in a zoning system based on changes in production potential, using simulation models (SWAT) and GIS (ArcGIS) to simulate and map the yield of rainfed maize cultivation across the surface of state at different ranges of performance.

The yield ranges were correlated with some climatic parameters (temperature, precipitation and radiation) and soil (depth, texture, organic matter) a strong influence was observed of the depth and texture of the soil in crop yield at intervals of climatic variation.

With regard to crop yields obtained, we performed the conversion of fermentable biomass (grain and crop residues) in ethanol (1 st and 2 nd generation) according to the yield per ha-1 or marginal zone potential. Determining that the state of Veracruz has a very good aptitude bioenergetics using corn as feedstock.

## 1. INTRODUCCION

La seguridad energética y el efecto contaminante de los combustibles fósiles han generado el interés por encontrar carburantes que sean capaces de cubrir la demanda energética actual con un efecto contaminante menor.

Actualmente los biocombustibles figuran como los sustitutos de los combustibles fósiles, ya que se le está tomando mucho interés a nivel global. En América los principales países productores son Brasil y Estados Unidos, mientras que en el resto de los países apenas se está empezando a trabajar en ello.

México es un importante productor, consumidor y exportador de petróleo, sin embargo las predicciones de su futuro agotamiento pone en peligro la seguridad energética del país y abre la oportunidad a los biocombustibles, por lo que se ha creado un marco regulatorio que apoya a las investigaciones pertinentes; esto con el fin de ampliar la matriz energética y contar con un respaldo en caso de una crisis energética.

Los cultivos con biomasa adecuada para la producción de biocombustibles son aquellos que cuentan principalmente con un alto contenido de almidón, sacarosa y celulosa.

En este trabajo se caracteriza el cultivo de maíz como insumo para obtener bioetanol para el estado de Veracruz con el fin de conocer el potencial de producción del bioetanol en el estado.

Para determinar el potencial de producción de bioetanol en el estado de Veracruz, primero fue necesario conocer el rendimiento potencial del cultivo de maíz para posteriormente hacer la conversión de grano y biomasa a etanol, por lo tanto mediante la calibración del ArcSWAT se elaboró un mapa de rendimientos del

cultivo de maíz bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz. Mediante la correlación de algunos parámetros climáticos y edáficos se identificaron los rendimientos más altos del cultivo.



## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo general:

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

### 1.1.2. Objetivo específico:

- Caracterizar el cultivo de maíz como insumo para producir bioetanol y sus subproductos.
- Simular el rendimiento de granos y biomasa total del cultivo de maíz en el estado de Veracruz.
- Cartografiar el rendimiento de granos y biomasa total del cultivo de maíz en el estado de Veracruz.
- Determinar el rendimiento potencial de bioetanol de maíz 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 maíz 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 maíz presenta características adecuadas como insumo para elaborar bioetanol.
- El rendimiento del cultivo de maíz se encuentra sujeto a las variaciones edafoclimáticas del estado de Veracruz
- Existe una variación en la distribución geográfica de los intervalos de rendimiento de maíz en el estado de Veracruz.
- La producción de bioetanol de maíz en el estado de Veracruz está 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 problemas ambientales y de ahí que su promoción se fundamenta en varios argumentos sobre reducción de la contaminación, mas tarde pasa a tener importancia razones de estrategia nacional en el suministro y de aseguramiento de productos energéticos (Hilbert, 2008).

En general, los conceptos sobre biocombustibles coinciden en que estos son producidos a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial, desechos orgánicos o cualquier forma de biomasa (Hernández, 2008).

Los biocombustibles se utilizan, mayoritariamente, en el sector del transporte como:

- Biodiesel: producido a partir de la reacción de los aceites vegetales (palma africana, soya, higuera, jatropha curcas, colza y otras plantas) o grasas animales con alcohol.
- Bioetanol: se produce a partir de la fermentación de materia orgánica con biomasa proveniente de cultivos (Caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca y otros).
- Biogás: es un gas compuesto principalmente por metano, formado por la degradación de materia orgánica (Torres y Carrera, 2010; IICA, 2007b).

### 2.1.2. Bioetanol de primera y segunda generación

El alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como los cereales, remolacha, caña de azúcar, o biomasa (García y García, 2006).

El etanol se fabrica siguiendo un proceso similar al de la cerveza, la materia prima es muy variada, los compuestos energéticos se transforman en azúcares, posteriormente a etanol por medio de fermentación alcohólica (Salinas y Gasca, 2009).

Los biocombustibles de segunda generación se diferencian de los biocombustibles convencionales o de primera generación en cuanto a dos aspectos claves: las materias primas utilizadas y las tecnologías que se aplican para su fabricación (Hackenberg, 2008; Salinas y Gasca, 2009).

Se producen a partir de materia prima que no son utilizadas como fuente de alimentación humana como esquilmos agrícolas o desechos industriales y urbanos (Serna, *et al.*, 2011), para lo cual se utilizan tecnologías que todavía están en etapas de investigación y desarrollo, con costos de producción aun muy elevados (IICA, 2007a).

Existe el etanol anhidrido y el hidratado, que se diferencian en el contenido de agua que poseen con aproximadamente 0.5% y 5% respectivamente, por un lado el etanol anhidrido se utiliza mezclado con gasolina de origen fósil, mientras que el etanol hidratado se utiliza puro en vehículos que han sido adaptadas para este combustible (IICA, 2007b).

### 2.1.3. Estadísticas de producción de los biocombustibles

La producción de bioetanol ha aumentado significativamente, pasando de menos de 20.000 millones de litros al año en el 2000 hasta 90.000 millones en 2009. La mayor parte de este crecimiento se ha registrado principalmente en Estados Unidos, Brasil y Alemania que aglutinan más de las tres cuartas partes de la producción de bioetanol (Torres y Carrera, 2010).

El potencial energético a partir de biomasa en ALC (América Latina y el Caribe) para el año 2050 haciendo uso de las tierras agrícolas se estima que puede variar entre 47 y 221 exajulios (EJ)<sup>5</sup> por año, dependiendo del sistema de producción, cifras que representan entre 11 y 51% del consumo mundial de energía primaria en el 2003 (CEPAL, 2008b).

Brasil actualmente produce y consume la mayor parte del bioetanol producido en ALC, con una participación de más del 90% del total. Aun con un aumento proyectado del consumo en otros países (especialmente Colombia y México) en el año 2015, este país todavía será responsable por más del 80% del consumo total de bioetanol en la región de ALC (IICA, 2010). Se considera que en un periodo de 15 años entre el 2015-2030 se sustituirá parcial y progresivamente los carburantes fósiles por biocombustibles (Gazzoni, 2009).

### 2.1.4. Rentabilidad de los biocombustibles

Los biocarburos pertenecen a un sector altamente dependiente de exenciones de impuestos porque económicamente son menos rentables que los combustibles fósiles, por lo que es un sector totalmente vinculado a las iniciativas políticas de fomento de seguridad energética y de la protección medioambiental (Castillo y Lozano, 2009).

El hecho de que los biocombustibles sean más caros de producir que los combustibles convencionales hace que el sector necesite del respaldo gubernamental para su desarrollo y competitividad en costes con respecto a los combustibles derivados del petróleo (Merino y Nonay, 2009).

Amador (2007) menciona que la rentabilidad de los biocombustibles a corto plazo está en función de varios factores como por ejemplo el precio de los insumos y del combustible, la tecnología necesaria para la producción y, del aprovechamiento de residuos, subsidios y aranceles.

Existe una gran presión sobre los precios de los biocombustibles para hacerlos competitivos frente a los combustibles fósiles, extendiéndola a los costos de producción de los insumos agrícolas, los cuales suelen presentar entre un 70-80 % del costo total del biocombustible (CEPAL, 2008b).

## **2.2. Factores que promueven la producción de los biocombustibles**

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

La crisis energética es un problema global, el cual se fundamenta en dos puntos, en primer término las mayores reservas petroleras están concentradas en áreas de alta conflictividad social y geopolítica, como segundo punto el alto nivel de consumo del petróleo oscila en los 76 millones de barriles por día, remarcando que las reservas conocidas solo tienen un rango de vida para abastecer a la sociedad por aproximadamente 75 años (MAIZAR, 2004).

América Latina reúne alrededor del 13% de las reservas probadas de petróleo en el mundo, estas reservas se encuentran altamente concentradas en apenas 3 países: Venezuela, México y Brasil, en conjunto 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 del mundo con mayores reservas de petróleo probadas, el resto posee una situación crítica en términos de seguridad energética actual y proyectada, dada su alta dependencia de las importaciones de petróleo (IICA, 2010).

Sin embargo, entre 1987 y 2007, México ha visto decaer drásticamente sus reservas, que pasaron de casi 50.000 millones de barriles hace 20 años a solamente 13.000 (Zeraoui, 2008).

Esta situación, sumada a la contaminación ambiental y al calentamiento global, provocados en gran medida por el uso de este tipo de combustibles, es un reto de enormes proporciones, pero también una oportunidad para la implementación de energías renovables (IICA, 2007a).

### 2.2.2. Cambio climático y calentamiento global

El paradigma del fin del siglo XX ha sido que la atmósfera no resiste más emisiones de dióxido de carbono y otros gases responsables de provocar el efecto invernadero y generar el calentamiento global del planeta, amenazando la vida de todas las especies (MAIZAR, 2004).

Los argumentos de carácter ambiental se vinculan fundamentalmente con la necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con los consecuentes impactos favorables, tanto en el plano global como a nivel del medio ambiente local (CEPAL, 2008a). La sustitución de los combustibles fósiles por biocombustibles en el transporte va en línea con los compromisos asumidos en el marco del protocolo de Kioto, en la medida en que contribuyan con la reducción de las emisiones GEI (IICA 2010).

Los biocombustibles son productos biodegradables, el 85% se degrada en aproximadamente 28 días, lo cual representa una reducción en los niveles de contaminación (Arias, *et al.*, 2006).

Durante su desarrollo una planta absorbe la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que es desprendido durante la combustión de los biocombustible por lo tanto son una fuente de combustible renovable limpia, aumenta la potencia del combustible bajo coste, es fácil de producir y reduce entre un 40% y 80% las emisiones de gases invernadero de vehículos (William, 2007).

### 2.2.3. Desarrollo rural

La producción de los biocombustibles puede tener un impacto positivo sobre el empleo agrícola y los medios de vida, especialmente cuando el cultivo involucra a agricultores de pequeña escala e instalaciones para la conversión que se localizan cerca de la fuente de los cultivos en áreas rurales (Dufey, 2006).

Por lo tanto los países en desarrollo que se encuentran ubicados en zonas cálidas o tropicales de buen potencial agrícola y con excelentes aptitudes bioenergéticas, tienen la ventaja de aprovechar el precio de la materia prima (IICA 2010).

Los programas de biocombustibles tienen un gran potencial para ofrecer nuevas oportunidades a las áreas rurales. Sin embargo, existen los riesgos que estos programas conduzcan a una concentración de tierras, y/o liberen mano de obra por la mecanización (CEPAL, 2007).



#### 2.2.4. Seguridad alimentaria

El reciente aumento de los precios de los alimentos no puede ser explicada únicamente por el crecimiento en la producción de biocombustibles, sin embargo, la relación del aumento de la demanda y producción de este energético y el aumento en los precios de los productos agrícolas se observa justo en los productos que están siendo utilizados para la producción de estas energías alternativas (Gonzales y Castañeda, 2008).

Por lo tanto, existe un desafío que consiste en promover la producción de las bioenergías sin perjudicar la oferta de alimentos, mediante la inserción de los biocombustibles en la matriz energética de los países de ALC (América Latina y el Caribe), específicamente el etanol y el biodiesel, lo que permitiría pasar de una agricultura dependiente del petróleo a una mas sustentable (IICA 2010; 2009b).

En general los biocombustibles pueden afectar la seguridad alimentaria de diferentes maneras, por una parte, el aumento de los precios de los productos básicos provocado por los biocombustibles perjudica a los importadores de alimentos, pero por otro lado, dicho incremento también pueden estimular la producción agrícola nacional de los pequeños agricultores en los países en desarrollo (FAO, 2009).

Los bioenergéticos representan tanto oportunidades como riesgos para la seguridad alimentaria, estas varían dependiendo del espacio y tiempo en la evolución del mercado y de la tecnología (FAO y CEPAL, 2007).

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

Actualmente la mayoría de los países de América Latina y el Caribe (ALC) han implementado o están en proceso de implementación de políticas o programas que incentivan la producción de biocombustibles, el desarrollo de los biocombustibles representa una oportunidad importante para la agricultura de la región, en esta circunstancia solo se concretara y será puesta en marcha si los marcos regulatorios propician o promueven su inserción en las matrices energéticas de los países (IICA, 2010).

Las leyes crean un marco amplio y a la vez un régimen especial para favorecer el desarrollo de la industria de los biocombustibles, el cual consiste en estímulos en el ámbito tributario, mediante el establecimiento de exenciones impositivas, garantía de estabilidad fiscal, periodos de gracia tributaria; liberación impositiva para la adquisición de bienes capital, entre otras medidas de ese orden; con las excepciones y particularidades en cada país (Ajila y Chilingua, 2007).

Investigaciones realizadas por el IICA (2007a) menciona que en América Latina y el Caribe, 21 países cuentan con por lo menos un marco regulador, leyes o incentivos fiscales que impulsen el desarrollo de los Bioenergéticos; Argentina, Belice, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, EUA., El Salvador, Guatemala, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Republica Dominicana, Uruguay y Venezuela figuran en la lista.

El incentivo más importante, aplicado por casi todos los países de la región que ya disponen de una política para los biocombustibles, es la exención de diferentes tipos de impuestos (impuesto al valor agregado, impuesto a las ganancias, impuesto sobre los biocombustibles líquidos y gas natural, entre otros), a lo largo de varias etapas de la cadena productiva de biocombustibles; se espera que el sector agrícola, como proveedor de materia prima se incentive y se beneficie del dinamismo del sector industrial (IICA, 2010).

En México el interés por conocer y desarrollar la tecnología de los biocombustibles llevó a la cámara de diputados y senadores a desarrollar una ley que impulse y ampare a la investigación de bioenergéticos, esta ley fue proclamada en la elaboración de 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 toda la comunidad científica y académica, para el desarrollo de proyectos que lleven a México a la sustentabilidad energética (Diario Oficial de la Federación, 2008).

### **2.3. El cultivo de maíz en Veracruz**

#### 2.3.1. Superficie cultivada de maíz

A nivel mundial se producen cerca de 580 millones de toneladas de maíz, con inventarios anuales de aproximadamente 72 millones de toneladas, los principales países o regiones productoras que aportan el 75% del total son: Estados Unidos de América con un 37%, China 19%, Brasil 5.9%, Unión Económico-Europea 5.5%, México 3.2%, Argentina 2.2%, Sudáfrica 1.5% y Canadá 1.2% (Tinoco, *et al.*, 2002).

En base a datos registrados por el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) durante el periodo 1996-2006 la producción nacional del maíz lideró principalmente por 5 entidades de la república, estos contribuyendo con el 55% de la producción total promedio anual: Jalisco aportó el 15.4%, Sinaloa 14.4%, Estado de México 9.9%, Chiapas 9% y Michoacán 6.5%; el 45% de la producción restante fue aportado por 27 estados más de la república figurando Guerrero, Veracruz, Guanajuato, Puebla, Oaxaca y Chihuahua principalmente.

Los datos de maíz en grano para el estado de Veracruz a diciembre del 2010, fue de 186,262.94 hectáreas como superficie cosechada y 390,246.93 toneladas como producción para todos los ciclos, los principales municipios productores se muestran en el Cuadro 1, mientras que el Cuadro 2 muestra los que destinaron una mayor superficie a este cultivo.

Cuadro 1. Datos de maíz en grano para el estado de Veracruz a diciembre de 2010.

<b>Municipio</b>	<b>Producción obtenida (ton)</b>	<b>Rendimiento obtenido (ton/ha)</b>	<b>Superficie cosechada (ha)</b>
Isla	19, 530.00	5.0	3,906
José Azueta	19, 135.00	5.0	3, 827
Papantla	18, 000.00	1.82	9, 850
Playa Vicente	21, 000.00	3.0	6, 998
San Andrés Tuxtla	30, 195.00	3.0	10, 065
Otros	735, 119.56	1,7	411,372.94
<b>Total</b>	<b>842, 979.56</b>	<b>1.8</b>	<b>446, 018.94</b>

Fuente: [www.oeidrus-veracruz.gob.mx](http://www.oeidrus-veracruz.gob.mx) citado por Gobierno del estado de Veracruz, 2011

Cuadro 2. Principales municipios en Veracruz por superficie de maíz grano (Hectáreas).

<b>Municipios</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
Papantla	16,393.50	19,926	14,230	25,577	23,422
San Andrés Tuxtla	16,153	22,782	22,237	21,465	21,864
Playa Vicente	12,750	11,820	12,370	14,059	14,776
Sotepan	4,465	13,216	9,537	14,910	14,205
Isla	2,414	4,450	8,250	4,132	8,250
<b>Total</b>	<b>496,423.51</b>	<b>544,539.54</b>	<b>464,759</b>	<b>555,722</b>	<b>530,881.07</b>

Fuente: [www.siacon.sagarpa.gob.mx](http://www.siacon.sagarpa.gob.mx) citado por Gobierno del estado de Veracruz, 2011

### 2.3.2. Paquete tecnológico del cultivo y costos de producción

El estado de Veracruz cuenta con un manual de producción del cultivo de maíz elaborado por Tinoco *et al.*, (2002) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícola y Pecuaria (INIFAP) en el cual se hacen las recomendaciones para obtener altos rendimientos del grano, cuya información incluye todas las actividades que se necesitan realizar para la producción del cultivo, desde la preparación del terreno hasta la cosecha.

Para algunos productores de este país los costos de producción son mayores a los precios internacionales. De acuerdo con información del estudio realizado en 2003 por el Instituto de Agricultura y Políticas de Comercio (IATP), se estima que el precio de exportación está por debajo del costo de producción hasta un rango de 25 a 30% (SAGARPA-SIAP).

Según Ayala *et al.*, (2010) los costos de producción del maíz para el estado de Hidalgo en el año 2007 considerando un rendimiento de 5.8 t en riego y vendiendo el grano a \$ 2,010.00/ton, la ganancia que se obtuvo fue de \$312.00/ha sin considerar el subsidio del PROCAMPO, pues solo el 42% de los productores en el ciclo primavera-verano 2007 contaron con dicho apoyo, sumándole a este problema la caída de los precios del grano, la rentabilidad de este producto afecta a los productores a medida que el precio de los insumos aumenta y las ganancias se minimizan.

## 2.4. Zonificación agroecológica

### 2.4.1. Conceptos generales.

Tapia (1997) define al agroecosistema como un conjunto de elementos bióticos y abióticos, que interactúan en un mismo espacio; por lo tanto define a la zonificación agroecológica (ZAE) como las diferencias que se presentan en un espacio definido que resultan de las variables de interacción que afectan al uso de la tierra con la finalidad de determinar los sistemas de producción idóneos para el área en estudio y por lo tanto tener un mejor control y uso del suelo.

La ZAE es una metodología basada en una serie de procedimientos lógicos que permiten la estimación cuantitativa de rendimientos de cada zona agroecológica, por lo tanto la aplicación de esta metodología es estimar la aptitud de las tierras y la productividad potencial para usos específicos mediante 3 aplicaciones básicas: a) Inventario de tipos de usos de tierras y sus requerimientos ecológicos, b) Definición y cartografía de las zonas agroecológicas en base a los inventarios de recursos tierras (incluyendo clima, relieve y suelos), y c) Evaluación de la aptitud de tierras de cada zona agroecológica. La ZAE se basa en una serie de procedimientos lógicos que permiten la estimación cuantitativa de rendimientos para cada zona o celda agroecológica (FAO, 1997).

### 2.4.2. Zonificación utilizando sobre posición de mapas

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

En México se han realizado varios trabajos de zonificación agroecológica para determinar el uso potencial y marginal del suelo. Aceves *et al.*, (2008) realizaron

un estudio agroecológico para determinar zonas potenciales para el cultivo de sorgo en el estado de Tabasco. Mientras que Tinoco *et al.*, (2002) aplicaron la metodología para identificar áreas potenciales para el cultivo de maíz en el estado de Veracruz y Tabasco. Ruiz y Silva (1999) zonificaron los valles de Oaxaca para identificar áreas potenciales para el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal y poder determinar así las practicas de producción adecuadas.

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).

## **2.5. El modelo SWAT**

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

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas, 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 (Oñate y Aguilar, 2003).

El modelo está conformado por un conjunto de sub-modelos, 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).

El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas del cruce de los diferentes tipos de suelo con las coberturas presentes (Oñate y Aguilar, 2003).

La calibración de un modelo como SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los datos observados y simulados, mediante el cambio de los parámetros de mayor influencia. El modelo requiere la introducción de información topográfica, de tipos y usos de suelo, datos meteorológicos y datos sobre los acuíferos de la cuenca (Galván *et al.*, 2007).

#### 2.5.2. Trabajos de cálculo de potencial productivo usando SWAT.

Proaño, *et al.*, (2006) aplicaron el modelo hidrológico SWAT para determinar el efecto que tienen las diferentes prácticas agrícolas en la generación de caudales y sedimentos en el Rio Ambato, obteniendo como resultado una baja producción de sedimentos, en la categoría de erosión muy baja.

Galván *et al.*, (2007) aplicaron el SWAT en la simulación de un modelo hidrológico para poder cuantificar la carga contaminante transportada. Oñate y Aguilar (2003) aplicaron el modelo 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. Mientras que Uribe y Quintero (2011) aplicaron el modelo para la cuantificación de todas las variables del balance hídrico del flujo del agua en el suelo y agua en la vegetación.



En México ya se han realizado trabajos aplicando el SWAT, Torres (2004; *et al.*, 2005) aplicó el modelo para evaluar la capacidad predictiva para simular la producción de agua, sedimentos, gastos medios y producción de maíz en la cuenca.

## **2.6. Sistemas de información geográfica**

### 2.6.1. Generalidades

Los sistemas de información geográfica (SIG) han surgido como herramientas para la manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos estadísticos, espaciales y temporales, que son necesarias para generar de una forma flexible, versátil e integrada, productos de información ya sean mapas o informes para la toma de decisiones sobre el uso de tierras (FAO, 1997).

Almacenan información cartográfica digital a la cual se le anexa una información atributiva en forma de tablas que contienen datos descriptivos que permiten realizar las consultas, análisis, gráficos y reportes de la data espacial (Behm, 2005).

Según Domínguez (2000) existen cinco argumentos básicos para la utilización de un SIG: a) permiten realizar comparaciones entre escalas y perspectivas emulando una cierta capacidad de representación de diferentes lugares al mismo tiempo, b) permite diferenciar entre cambios cualitativos y cuantitativos, c) permite gestionar un gran volumen de información a diferentes escalas y proyecciones, d) integra espacialmente datos tabulares y geográficos junto a cálculos sobre variables (topología), y e) admite multiplicidad de aplicaciones y desarrollos.

### 2.6.2. ArcMap.

ArcView Gis es un software diseñado para trabajar en sistemas de información geográfica, está constituido por un conjunto de herramientas para visualizar, explorar, consultar, editar y analizar información asociada a una localización geográfica, es un producto ESRI (Environment System Research Institute) (Behm, 2005).

Con ArcView Gis se puede construir los mapas dinámicos e inteligentes que permitan visualizar patrones, tendencias y singularidades en sus datos, incluye formas fáciles de levantar mapas, formatos predefinidos de mapas y una librería de elementos extensa, que permiten elaborar mapas de calidad ([www.softwaregis.cl](http://www.softwaregis.cl)).

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 espacial, edición de datos y geoprocesamiento. ArcMap es la aplicación central de ArcGIS. Este modulo permite la visualización, consulta, análisis y presentación de los datos geográficos (Vicente y Behm, 2008).

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Área de trabajo

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

El área de estudio abarca la superficie total del estado de Veracruz con 7.18 millones de hectáreas, ubicándose en las coordenadas con dirección al Norte  $22^{\circ} 28'$ , al Sur  $17^{\circ} 09'$  de latitud Norte; al Este  $93^{\circ} 36'$  y al Oeste  $98^{\circ} 39'$  de longitud Oeste; representando el 3.7% de la superficie total de México. La entidad colinda al Norte con Tamaulipas y el Golfo de México; 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 (Monografía del edo. Veracruz, 2009).



Figura 1. Localización del estado de Veracruz

Los datos se obtuvieron a partir de mapas temáticos digitales escala 1:250,000 adquirido del Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía e Informática (INEGI)

cuya información sirvió para determinar la distribución climática, edáfica, tipo y uso de suelos (Figuras 2, 3, 4 y 5).

### 3.1.2. Clima.

En el estado existen distintos climas distribuidos sobre la superficie de la entidad, observando que más del 80% del territorio presenta clima cálido, predominando el cálido subhúmedo (figura 2) por presentarse en casi la mitad de la superficie del estado.

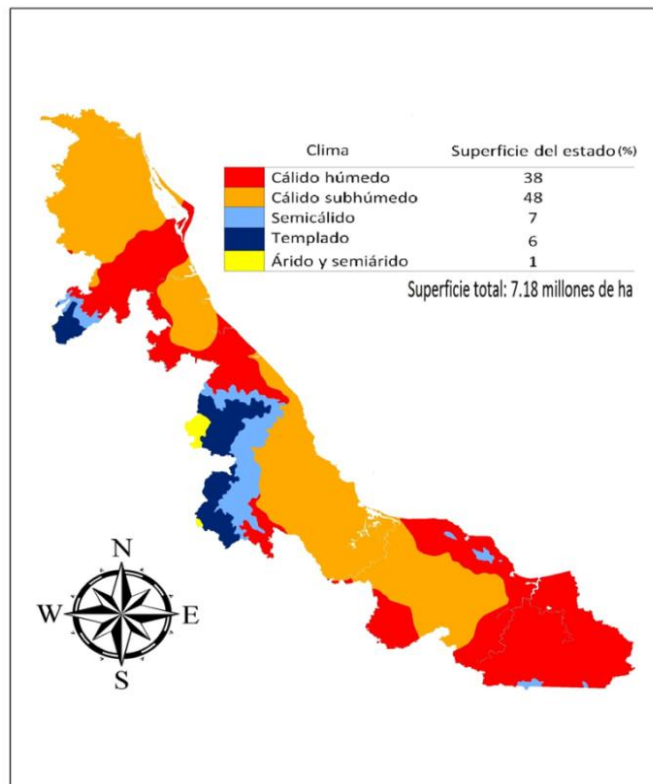


Figura 2. Climas del estado de Veracruz

### 3.1.3. Topografía

El estado de Veracruz presenta altitudes que van desde el nivel del mar hasta el pico de Orizaba a 5,610 msnm. La Figura 3 muestra la topográfica del estado de Veracruz, así como la superficie ocupada por este.

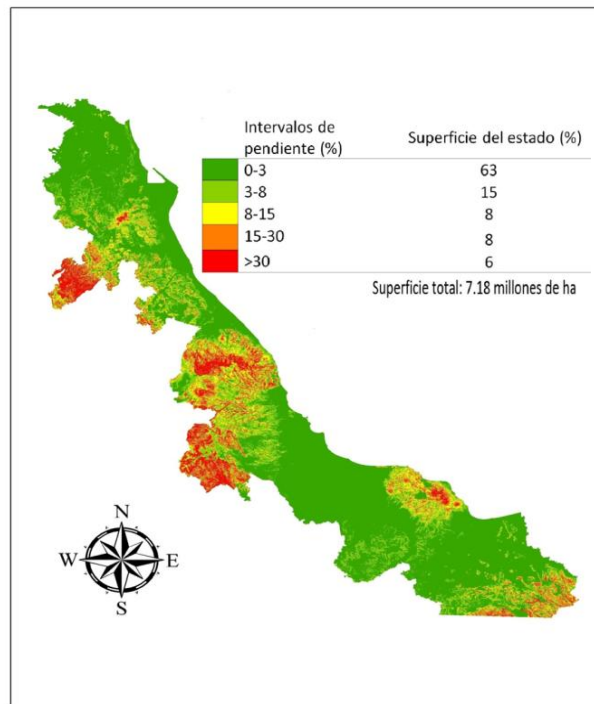


Figura 3. Topografía del estado de Veracruz

### 3.1.4. Suelos.

Los tipos de suelo presentes en el estado de Veracruz se pueden observar en la Figura 4, en donde se presenta cada tipo de suelo con la respectiva superficie ocupada, observándose que los suelos arcillosos y francos ocupan en total el 66% de la superficie del estado.

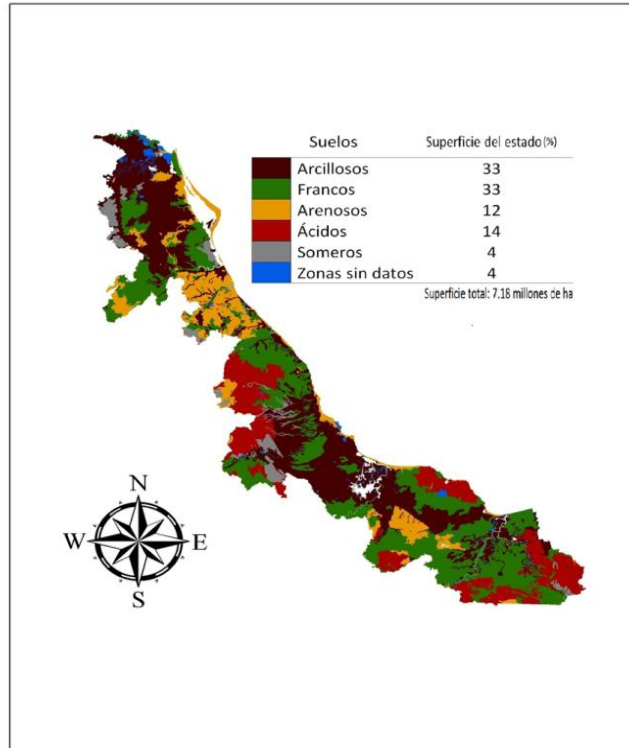


Figura 4. Mapa de suelos del estado de Veracruz

### 3.1.5. Uso de suelos.

El uso del suelo para el estado de Veracruz está clasificado en bosques y selvas, pastizales, áreas agrícolas y ciudades y cuerpos de agua. En la Figura 5 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 distribuidos en varias regiones ocupando así el 18% del área. El 4% restante es ocupado por las ciudades y cuerpos de agua.

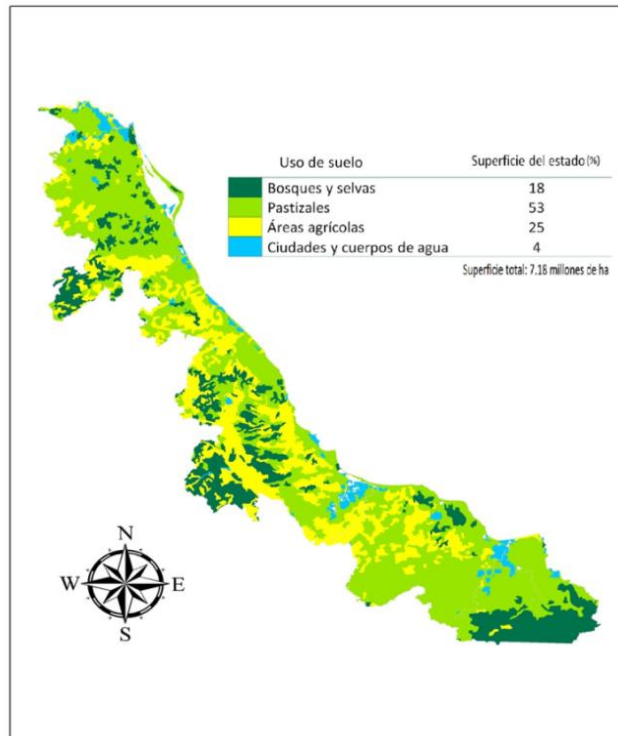


Figura 5. Mapa del uso de suelo del estado de Veracruz

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

Considerando las Figuras 2 a 5 se deduce que la relación entre el clima, la pendiente, el tipo y uso de suelo es evidente en la distribución de cada una de estas; 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 estas de tal manera que caracterice cada unidad de superficie.

## 3.2. Requerimientos del modelo

La simulación del rendimiento del cultivo de maíz se realizó utilizando el modelo SWAT, para ello 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 de archivos de texto que permiten indicar al modelo la información a usar de sus bases de datos.

### 3.2.1. Mapas

Los mapas se usaron en formato “grid” (requerimiento del software) con cuadrícula de 90m (escala del Modelo de Elevación Digital usado) con una proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) en la zona 14 del hemisferio norte, con base al elipsoide WGS84, escogiéndose esta proyección por ser la que más se ajustaba a la superficie del estado de Veracruz, pese al hecho de cierta superficie de la entidad se localiza sobre la zona 15 del mismo hemisferio. Los mapas utilizados fueron:

- El DEM que fue elaborado a partir del mapa de curvas de nivel de INEGI.
- El mapa de edafología que se elaboro a partir del mapa de edafología 1:250000 serie 3 de INEGI, separando lo suelos que presentaban fase lítica en nuevas categorías.
- El mapa de ríos de INEGI.
- El mapa de uso de suelo el cual, debido a los objetivos del trabajo, se elaboro considerando toda la superficie del estado como área potencial para la siembra de maíz.



### 3.2.2. Bases de datos y catálogos

La información necesaria que el programa requiere para realizar simulaciones y cálculos se encuentran en varias bases de datos en un documento de Access (Archivo del programa). Para la simulación del cultivo de maíz en Veracruz se modifico algunas de las bases de datos existentes para incluir nuevas categorías con el fin de adaptar la información a las condiciones del estado. La información modificada fue de la base de datos de edafología, parámetros fisiológicos del cultivo, clima, manejo y fertilizantes.

#### 3.2.2.1. Base de datos edafológico

El programa cuenta con una base de datos edáficos, sin embargo fue necesario crear una nueva para el estado de Veracruz ya que el existente es propio para 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, Quintana Roo, Chiapas y Oaxaca) de la zona tropical del sureste de México. Fue necesario estimar algunos datos faltantes y que eran necesarias para completar la base de datos del programa, estas se obtuvieron a partir de diferentes fuentes (Cuadro 3), a manera de ejemplo el Cuadro 4 presenta los datos ingresados al programa para el perfil típico del suelo Cambisol Calcarico.

Cuadro 3. Metodología y fuentes utilizadas para calcular los datos de suelo faltante.

Parámetro	Método usado para su obtención
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	$K_{usle} = \frac{0.00021 * M^{1.14} * (12 - MO) + 3.25 * (C_{soilstr} - 2) + 2.5(C_{perm} - 3)}{100}$
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).

Cuadro 4. Características del perfil típico del suelo Cambisol Calcarico.

Horizonte	Prof.	Text.	D.A.	H. D.	C.O.	C.H.S.	C.R.	Alb.	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>.

### 3.2.2.2. Parámetros fisiológicos del cultivo de maíz.

El cultivo de maíz se encuentra dentro de la base de datos de modelo, sin embargo los parámetros fisiológicos que incluye son propios de las variedades de maíz usadas en E.U.A. por lo que se modificaron de acuerdo a diversas fuentes de literatura aquellos que tienen mayor influencia en el rendimiento (Cuadro 5).

Cuadro 5. Parámetros fisiológicos del maíz utilizados por el SWAT.

Parámetro fisiológico	Valor	Unidades
Índice de área foliar máxima (LAI)	3	M <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>
Eficiencia en uso de la radiación (RUE)	35	Kg ha <sup>-1</sup> (Mjm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup>
Segundo punto de la curva de eficiencia en el uso de la radiación	42	Kg ha <sup>-1</sup> (Mjm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup>
Índice de cosecha (HI)	0.45	Kg ha <sup>-1</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup>
Temperatura base (Tb)	10	°C
Temperatura óptima (To)	25	°C
Altura máxima del dosel (H)	2.5 m	M
Profundidad máxima de raíces (Rd)	2 m	M
Altura máxima (MSNM)	1200	M
Altura mínima (MSNM)	0	M
Coefficiente de extinción de la luz	0.65	

### 3.2.2.3. Estaciones y datos climáticos.

Veracruz cuenta con 322 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el estado, así que para la información climática requerida por el programa, se trabajó a partir de los datos diarios de 137 estaciones climatológicas ya que seleccionaron estaciones 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 (Sharply y Williams,1990) se simuló los datos faltantes para el periodo 1960-2010 de temperatura máxima, temperatura

mínima, precipitación pluvial, así como todos los datos de radiación solar y humedad relativa, además se obtuvieron los datos estadísticos requeridos por SWAT (Anexo 1).

De las 137 estaciones climáticas trabajadas, el programa utilizó las 95 estaciones más representativas debido a que el modelo asigna a cada cuenca el clima de la estación más cercana a su centroide (Figura 6).

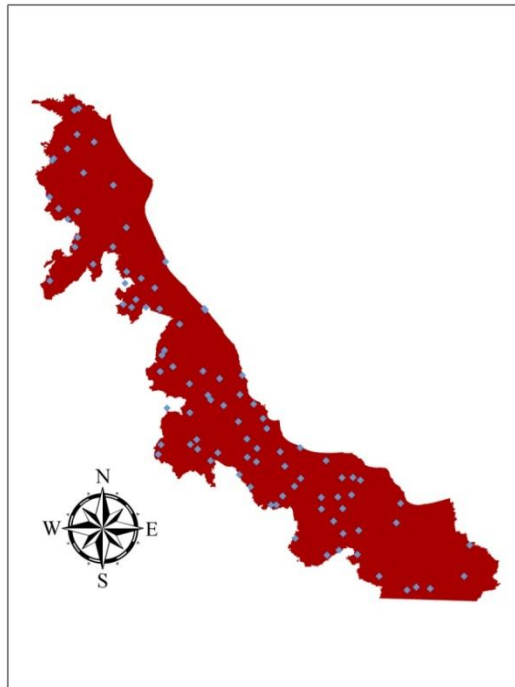


Figura 6. Distribución de las 95 estaciones meteorológicas.

#### 3.2.2.4. Practicas de manejo.

Se elaboro un manejo para el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal (Cuadro 6) diseñado para obtener altos rendimientos en el estado de Veracruz, basado en diferentes fuentes principalmente en el manual de producción del cultivo de maíz de Tinoco *et al* (2002).

Cuadro 6. Manejo del cultivo de maíz bajo condiciones de temporal para el estado de Veracruz.

<b>Actividad</b>	<b>Fecha</b>	<b>Mano de obra</b>	<b>Insumo</b>
Chapeo	Mayo 14	1	Chapeadora
Barbecho	Mayo 24	1	Arado de discos
Rastreo 1	Mayo 29	1	Rastra de discos
Rastreo 2	Mayo 30	1	Surcado
Surcado	Mayo 31	1	Tractor
Tratamiento de semillas	Junio 1	1	Semevin 375 (1.9L/20 kg semilla)
Siembra	Junio 1	1	Sembradora convencional
Fertilización 1	Junio 1	1	174kg UREA + 141kg super fosfato de calcio triple
Aplicación de herbicida 1	Junio 4	2	Gesaprim calibre 90 (2.22kg/ha)
Aplicación de insecticida	Junio 25	2	Cypervel200 (1.25L/ha)
Aporque	Junio 25	1	Cultivadora
Cultivo	Junio 26	3	174kg UREA
Fertilización 2	Junio 27	1	Mariposa
Aplicación de herbicida 2	Julio 5	2	Sansón
Aplicación de insecticida 2	Julio 15	2	Carbarilo 1kg/ha
Aplicación de insecticida 3	Agosto 9	2	Carbarilo 1kg/ha
Dobla	Sep. 8	6	Manual
Cosecha	Sep. 28	8	Manual

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.

#### 3.2.2.5. 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) usara.

### **3.3. Procedimiento de simulación**

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

#### 3.3.1. Delimitación de cuencas y subcuencas

El programa ArcSWAT trabaja a nivel de cuenca por lo tanto el estado de Veracruz se delimitó como tal a partir del DEM, la cuenca se acotó de acuerdo a los límites del estado de Veracruz para identificar el mayor número posible de subcuencas con la sobre posición del mapa de ríos. Primero el modelo calculó la dirección y acumulación de flujo, para luego crear la red de drenaje e identificar las salidas de una corriente de flujo a otra. Por último se le indica al modelo la creación de las subcuencas considerando todos los flujos de salida existentes, obteniendo finalmente 224 subcuencas.

### 3.3.2. Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH)

Las URH se generaron para identificar áreas con características únicas a partir de la sobre posición de las subcuencas y 3 mapas: a) Mapa de rangos de pendiente (Figura 3), el SWAT delimitó el área con cada tipo de pendiente utilizando el DEM; b) Mapa de edafología (Figura 4); c) Mapa de uso de suelos (Figura 5). Considerando la sobre posición de los mapas SWAT identifique 4,053 URH para el estado de Veracruz.

### 3.3.3. Asignación de parámetros climáticos y manejo del cultivo de maíz.

Se incorporaron los parámetros climáticos (temperatura y precipitación) diarios de las 95 estaciones usadas por el modelo, anexando los catálogos correspondientes. Posteriormente se asignó un manejo general para el cultivo de maíz en la base de datos de SWAT, asumiendo un solo uso de suelos para todo el estado.

### 3.3.4. 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 óptimo 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 maíz por URH. Posteriormente se asignó un intervalo de rendimiento por cada URH en el mapa de resultados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### Caracterización del cultivo

El maíz es un buen candidato para producir etanol de primera generación por su alto contenido de almidón en grano (Cuadro 7) y de segunda generación por los residuos de cosecha (Cuadro 8) considerando un rendimiento potencial de grano, además es uno de los cereales más importantes por superficie sembrada en el estado de Veracruz.

Cuadro 7. Composición química del grano de maíz.

Componentes		Maíz
Humedad del grano (%)		14
Contenido de materia seca (%)		86
Almidón (% del grano seco)		73
Glucosa (% sobre contenido de almidón)		69
Componentes celulares (% del grano seco)	Celulosa	33
	Hemicelulosa	21
	Lignina	21
Tasa de conversión grano-etanol (L t <sup>-1</sup> de grano seco)		415



Cuadro 8. Composición promedio típica de los residuos de cosecha del cultivo de maíz.

Componente		Maíz
Índice de residuos de cosecha (%)		55
Contenido de humedad (%)		20
Componentes celulares (% de materia seca)	Celulosa	34.98
	Hemicelulosa	23.15
	Lignina	15.53
Azúcares de 6-Carbonos (% de materia seca)	Glucan	35.04
	Galactan	2.13
	Manosan	1.13
Azúcares de 5-Carbonos (% de materia seca)	Xilan	20.20
	Arabinan	3.42
Etanol de celulosa-azúcares de 6 carbonos (L t <sup>-1</sup> )		251
% del etanol 2G total		61
Etanol de hemicelulosa-azúcares de 5 carbonos (L t <sup>-1</sup> )		158
% del etanol 2G total		39
Total de etanol 2G (L t <sup>-1</sup> )		409

El grano de maíz es usado para la alimentación humana, animal y como insumo bioenergético mientras que los granos secos de destilería debido a su alto valor nutritivo, pueden usarse principalmente para la alimentación de ganado y contribuir con la producción de carne y seguridad alimentaria (Cuadro 9).

Cuadro 9. Uso actual y potencial de grano, co-producto y residuos de cosecha del maíz en México.

Nombre del producto/ Insumo bioenergético		Uso actual/ potencial para	Cultivo
Genérico	Específico		Maíz
Producto económicamente importante	Grano	Alimento humano	✓
		Alimento animal	✓
		Etanol 1G	✓
Co-productos	GSD/ Harinas	Alimento humano	-
		Alimento animal	✓
		Generación de energía	-
		Mejorador de suelo	-
		Etanol 2G	-
Residuos de cosecha	CO2  Celulosa y Hemicelulosa	Industria	✓
		Agricultura	✓
		Alimento animal	✓
		Generación de energía	✓
		Mejorador de suelo	✓
		Etanol 2G	✓

### Cartografía de rendimiento

El rendimiento del cultivo de maíz estuvo fuertemente influenciado por parámetros edáficos y climáticos, mostrándose una variación de rendimientos de 0 a 9 t ha, en la Figura 7 se observa el rendimiento potencial y marginal del cultivo de maíz en el estado de Veracruz.

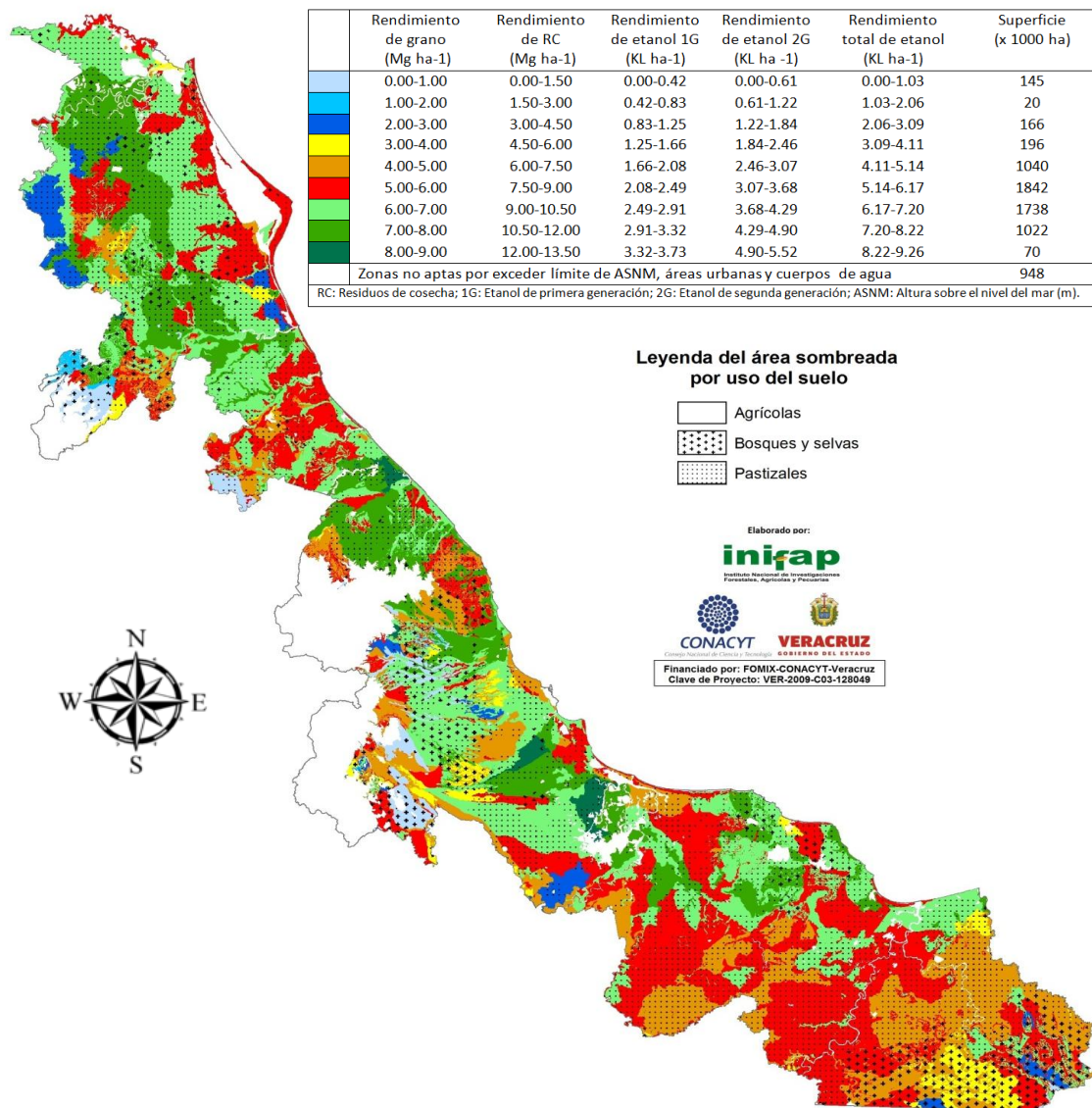


Figura 7. Mapa de rendimientos del cultivo de maíz

De las 7.187 millones de hectáreas del estado de Veracruz solo 6.239 millones de hectáreas son aptas según la modelación descartando 0.948 millones de hectáreas por estar ocupadas por áreas urbanas, cuerpos de agua y/o exceder msnm (elevaciones >1 200 msnm afectan el rendimiento del cultivo).

Observando los rendimientos obtenidos del cultivo de maíz (Figura 7), para la conversión del grano y residuos de cosecha a etanol de primera y segunda generación respectivamente se manejó un coeficiente de conversión de 420 L/t<sup>-1</sup> de biomasa fermentable, determinando entonces que por cada tonelada de grano se obtiene un total de 2.5 t<sup>-1</sup> de biomasa fermentable (grano y RC), por lo tanto se obtiene 1,030 L de etanol de primera y segunda generación.

### Análisis de factores

Utilizando los mapas de profundidad, textura, MO, temperatura, radiación y precipitación (Anexo 2 a 7) para buscar correlaciones entre los rendimientos del cultivo observados en el mapa de rendimientos

Cuadro 10. Ejemplo de URH afectadas por variables climáticas y edáficas

Radiación	Temp.	Precipitación	Profundidad	Textura	M.O.	Rendimiento (mg. Ha <sup>-1</sup> )
Alta	Media	Excesiva	Delgado	Franco	Alta	0-1 <sup>(a)</sup>
Media	Baja	Media	Somero	Franco arcilloso	Baja	1-2 <sup>(b)</sup>
Media	Media	Media	Delgado	Franco arcilloso	Alta	2-3 <sup>(c)</sup>
Baja	Alta	Media	Somero	Franco arcillo arenoso	Baja	3-4 <sup>(d)</sup>
Baja	Baja	Buena	Profundo	Arena franca	Baja	4-5 <sup>(e)</sup>
Media	Media	Media	Profundo	Arena Franca	Baja	5-6 <sup>(f)</sup>
Media	Media	Deficiente	Muy profundo	Arcilloso	Baja	6-7 <sup>(g)</sup>
Media	Media	Media	Muy profundo	Arcilloso	Baja	7-9 <sup>(h)</sup>

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

Se observaron óptimos rendimientos en áreas con temperatura, precipitación y radiación media, en suelos muy profundos y con textura arcillosa, por lo tanto el rendimiento se vio afectado cuando algunos o todos los parámetros no presentaban las condiciones optimas requeridas por el cultivo.

La profundidad del suelo mostró una mayor sensibilidad en el rendimiento ya que a medida que la profundidad aumentaba los rendimientos se elevan considerablemente, observándose un efecto contrario en suelos delgados y someros; por otro lado la materia orgánica no mostro influencia debido a que posiblemente su presencia estuvo sujeto a la profundidad (Suelos delgados presentaron alto contenido de materia orgánica).

De acuerdo a la correlación de los 6 parámetros a evaluar se observo que para obtener un alto rendimiento era necesario cumplir con las características positivas antes ya mencionadas, por lo tanto un solo factor negativo es suficiente para que el rendimiento descienda (Cuadro 10).

#### Análisis con el uso de suelo

Con el fin de conocer la superficie total disponible para uso del cultivo de maíz como insumo para bioetanol y no afectar a la seguridad alimentaria del estado de Veracruz se identifico y clasifíco el uso actual del suelo en: a) áreas agrícolas, b) bosques y selvas, c) pastizales, d) cuerpos de agua y áreas urbanas y e) área descartada (Anexo 9).

Observándose que cerca del 80% de la superficie es ocupada en conjunto por bosques y selvas, pastizales, cuerpos de agua y áreas urbanas; y el 20% restante es usada para la agricultura, ocupando una superficie de 1, 500,000 has.

Haciendo uso de las áreas destinadas a la agricultura sin pretender desplazar o cambiar el uso de suelo actual el rendimiento de etanol de primera y segunda generación usando maíz como insumo es considerablemente bueno.

## 5. CONCLUSION

El cultivo de maíz como insumo para bioenergéticos tiene un buen rendimiento potencial de etanol de primera y segunda generación por su alto contenido de almidón en grano y por el contenido de celulosa y hemicelulosa en los residuos de cosecha.

De acuerdo a la modelación y observando el mapa el mapa de rendimientos, el estado de Veracruz presenta buena aptitud bioenergética utilizando el cultivo de maíz como materia prima.

Por otro lado el rendimiento del cultivo estuvo fuertemente influenciado por los parámetros climáticos y edáficos, principalmente de la profundidad del suelo ya que a medida que la profundidad disminuye el rendimiento desciende considerablemente y es que este factor fue dominante con respecto a la textura, precipitación, radiación y temperatura cambiante observada en el mapa de rendimientos (Figura 7).

La M.O. fue el único parámetro que no mostró sensibilidad en el rendimiento del cultivo atribuyéndole este hecho a que los mejores rendimientos estuvieron presentes en suelos muy profundos en contraposición de la M.O. que se presenta en suelos someros y delgados.

Por lo tanto los óptimos rendimientos del cultivo de maíz se registraron en áreas con suelos profundos, textura arcillosa y radiación, temperatura y precipitación media.

Puntualizando entonces que solo basta con que un factor sea distinto al requerido para que el rendimiento del cultivo descienda.

## 6. LITERATURA CONSULTADA

- Aceves, L.A., Juárez, J.F., Palma, D.J., López, R., Rivera, B., Rincón, J.A., Morales, R., Hernández, R., Martínez, A. 2008. Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo de sorgo (*sorghum bicolor* L. Moench) en el estado de tabasco. SAGARPA, tomo XVI. Tabasco.
- Ajila, V.H. y Chilingua, B. 2007. Análisis de legislación sobre biocombustibles en América Latina. Artículos técnicos. Quito, EC, OLADE.
- Amador, O.A. 2008. Biocombustibles: una mirada a la coyuntura de 2007. *Economía informa*, Pesquisas, Núm. 350.
- Arias, A.F., Arbeláez, S.F., Ortega, J.D. 2006. Estrategia de desarrollo de biocombustibles: implicaciones para el sector agropecuario. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Republica de Colombia.
- Ayala, A.V., Sangerman-Jarquín, D., Schwentesius de Rinderman, R., Damian, M. A., Juárez, C.G. 2010. Fortalecimiento de la competitividad del sector agropecuario en Hidalgo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, vol. 1, núm. 2. México.
- Behm V. 2005. Curso básico de ArcView 3.2. Teoría y práctica. Caracas.
- Castillo, S., Lozano Y. 2009. Estudio de mercado “viabilidad de los biocombustibles: biodiesel y bioetanol”. Programa de doctorado ciencia e ingeniería agraria, Universidad de Castilla-La Mancha. España.

- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2007. Biocombustibles y su impacto potencial en la estructura agraria, precios y empleo en América Latina. Razo c., Astete-Miller, s., Saucedo, A., Ludeña, C.
- CEPAL. 2008a. Aporte de los biocombustibles a la sustentabilidad del desarrollo en ALC: Elementos para la formulación de políticas públicas. Pistonesi, H., Nadal, G., Bravo, V., Bouille, D. Santiago de CL.
- CEPAL. 2008b. Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe. Coviello, M.F., Gómez, J.J., Razo, C., Rodríguez, A.
- Domínguez, J. 2000. Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG). Informes Técnicos Ciemat, núm. 943. Madrid, España.
- Dufey, A. 2006. Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas, Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo, Londres.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 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.
- FAO, CEPAL. 2007. Oportunidades y riesgos del uso de la bioenergía para la seguridad alimentaria en América Latina y el Caribe.



- 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, C.R. IICA.
- Gobierno del estado de Veracruz. 2011. Monografía del maíz.
- González, A. y Castañeda, Y. 2008. "Biocombustibles, biotecnología y alimentos. Impactos sociales para México". *Argumentos*, núm. Mayo-Agosto, pp. 55-83.
- Hackenberg, N. 2008. Biocombustibles de segunda generación. Revista virtual REDESMA, vol. 2(2).
- 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. 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 2009b. Agricultura de ALC: bastón ante la crisis mundial y motor para el desarrollo futuro. IICA – San José, CR.

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.

Diario oficial de la federación 2008. Ley de Desarrollo y Promoción de los Bioenergéticos. México.

MAIZAR. 2004. La industria del etanol a partir del maíz: ¿es factible su desarrollo en la argentina?. Vergagni, G. A. Argentina.

Merino, P. A. y Nonay, T. 2009. Descripción, evolución y retos del sector de los biocombustibles. Boletín tecnológico de ICE N° 2971.

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.

Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P., Cisneros Cesar. 2006. Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del Río Ambato. Proyecto Cuencas Andinas-CODESAN-GTZ.

Ruiz, J. y Silva, M. E.1999. "Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca II. Determinación de las prácticas de producción adecuadas". Terra Latinoamericana 004.

- SAGARPA (secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación; SIAP (servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera). sf.b. situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2012. MX.
- Salinas, E. y Gasca, V. 2009. "Los biocombustibles". *El Cotidiano*, núm. Septiembre-Octubre, pp. 75-82.
- Serna F., Barrera L., Montiel H. 2011. Impacto social y económico en el uso de biocombustibles. *Journal of technology management & innovación*, vol. 6
- Tapia, M.E. 1997. Curso-taller. Manejo integral de microcuencas. 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 núm. 9. Veracruz, México.
- 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 Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia* vol. 39, núm. 005, pp. 481-490. Colegio de postgraduados. Texcoco, México.
- Torres y Carrera. Consultores de comunicación. 2010. Informe biocombustibles 2010. Madrid, España.

Uribe, N., Quintero, M. 2011. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la cuenca del 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.

William, R. 2007. Derechos de emisión de CO<sub>2</sub> ¿Inversión rentable o estrategia limpia?. *Estrategia financiera*, N°236.

Zeraoui Z. 2008. IV. Reflexiones sobre seguridad. Geopolítica y petróleo la nueva dependencia energética. *Desafíos*. Bogotá, Colombia.

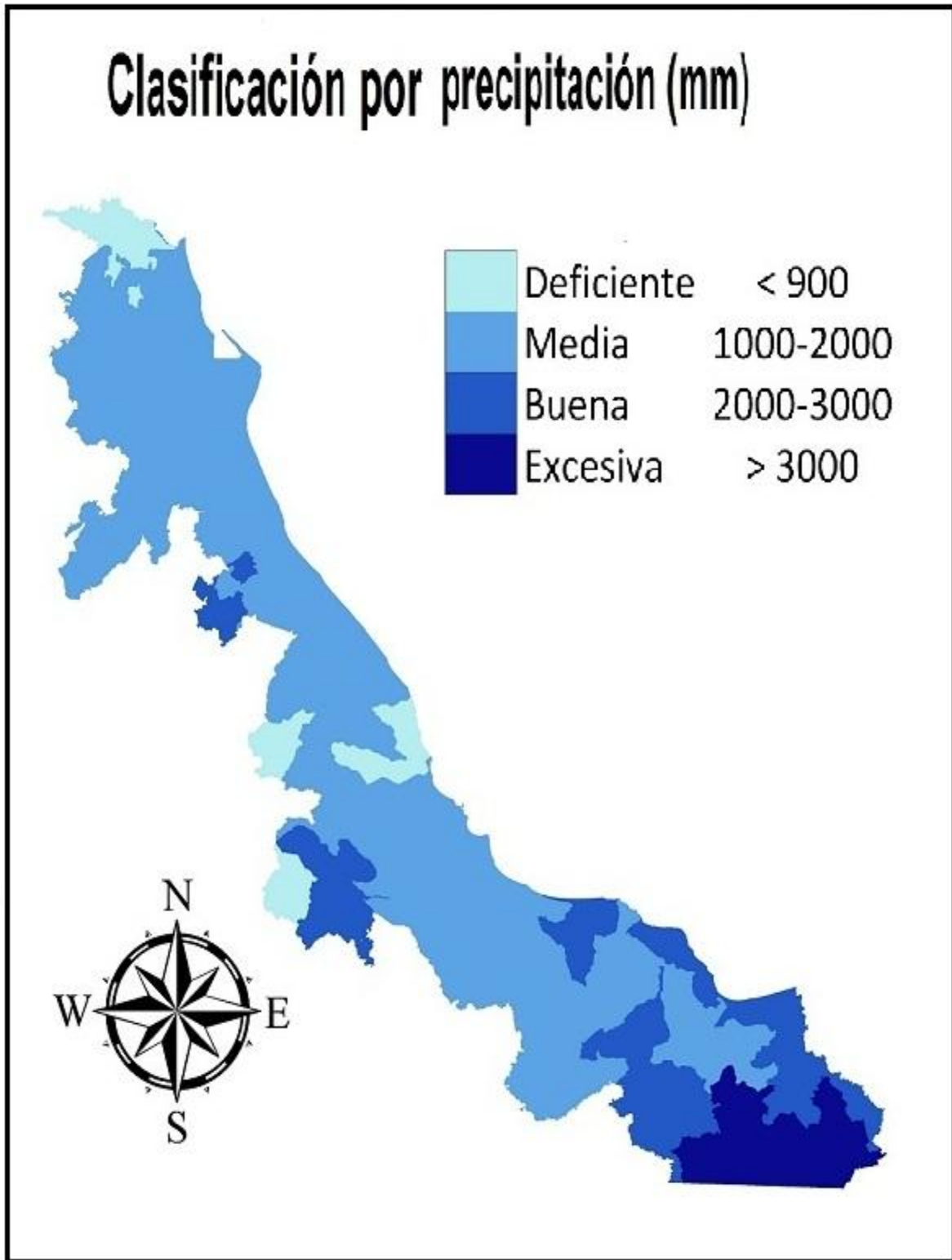
# **ANEXOS**

Anexo 1. Datos estadísticos de la estación 30078.

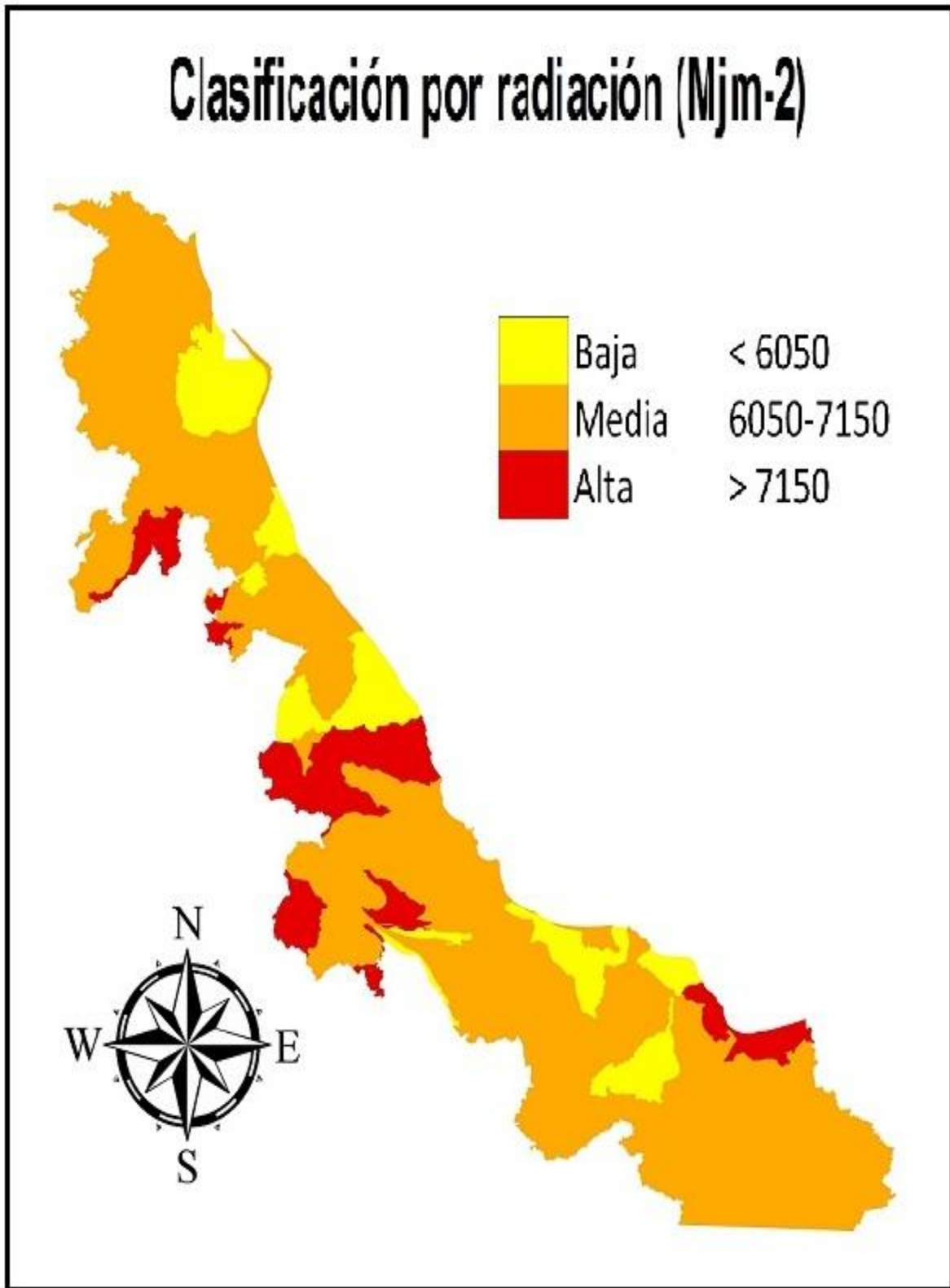
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Tmax	27.4	28.3	31.6	34.7	35.9	33.7	31.7	31.8	31.4	30.3	29.2	27.7
Tmin	16.4	16.6	18.8	21.1	23.2	23.2	22.3	22.3	22.2	21.1	19	17.1
DETmax	3.6	4	4.5	4.1	3.7	3.5	2.6	2.5	2.6	2.9	3	3.4
DETmin	2.4	2.4	2.3	2.1	1.7	1.2	1	1	1.1	1.7	2.5	2.5
PPM	29.6	10.1	14.1	12.4	54.4	259.7	329.4	333.3	252.9	87.9	32.6	27
DEPPM	16.81	4.22	6.24	12.53	16.97	24.23	19.88	22.03	22.41	11.58	8.74	9.38
CAPPM	2.336	1.759	3.696	2.604	2.252	3.097	1.721	2.007	3.388	1.794	2.183	3.348
PDHDS	0.07	0.07	0.076	0.043	0.121	0.267	0.421	0.398	0.297	0.198	0.105	0.085
PDHDH	0.223	0.227	0.253	0.203	0.278	0.611	0.613	0.616	0.658	0.396	0.329	0.41
PDPM	2.5	2.3	2.9	1.5	4.5	12.1	16.2	15.8	13.9	7.7	4.1	3.9
PMMH	17	8.3	8.5	15	28.1	46.9	39.1	39.7	37.8	22.8	14.4	11.9
RS	14	16	19	22	22	20	19	19	18	17	15	14

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 de precipitación del estado de Veracruz.

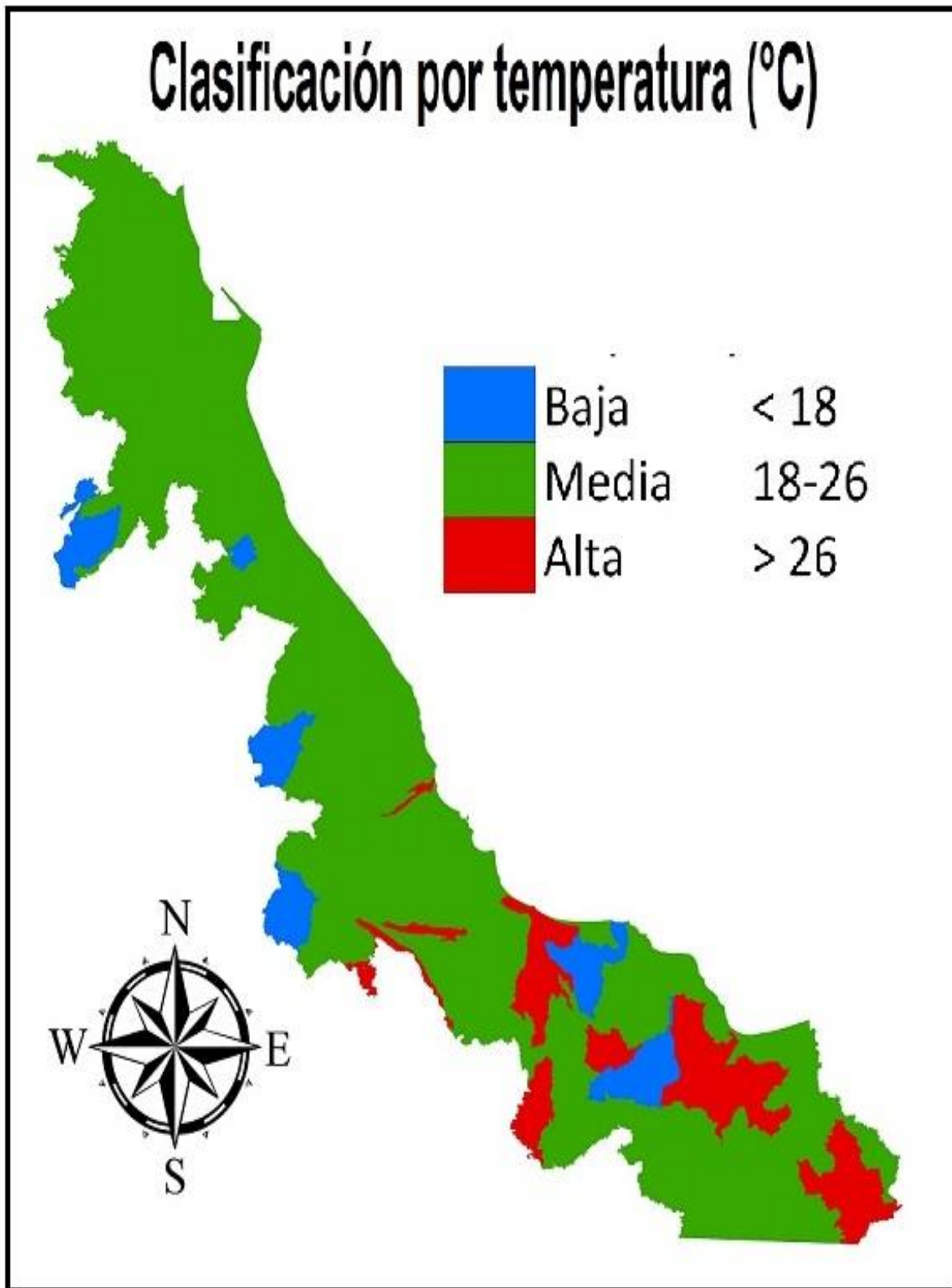


Anexo 3. Clasificación por radiación del estado de Veracruz.

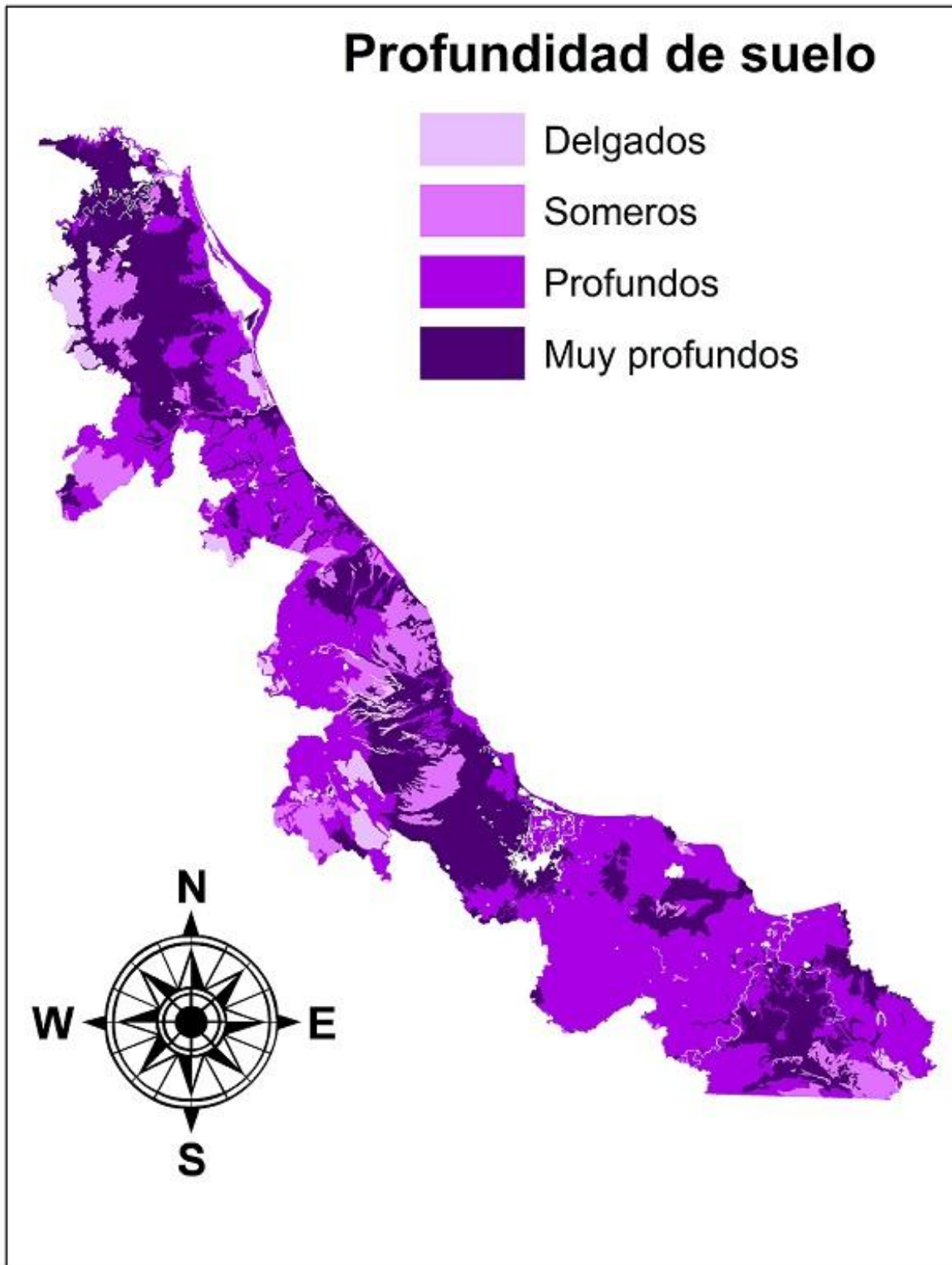




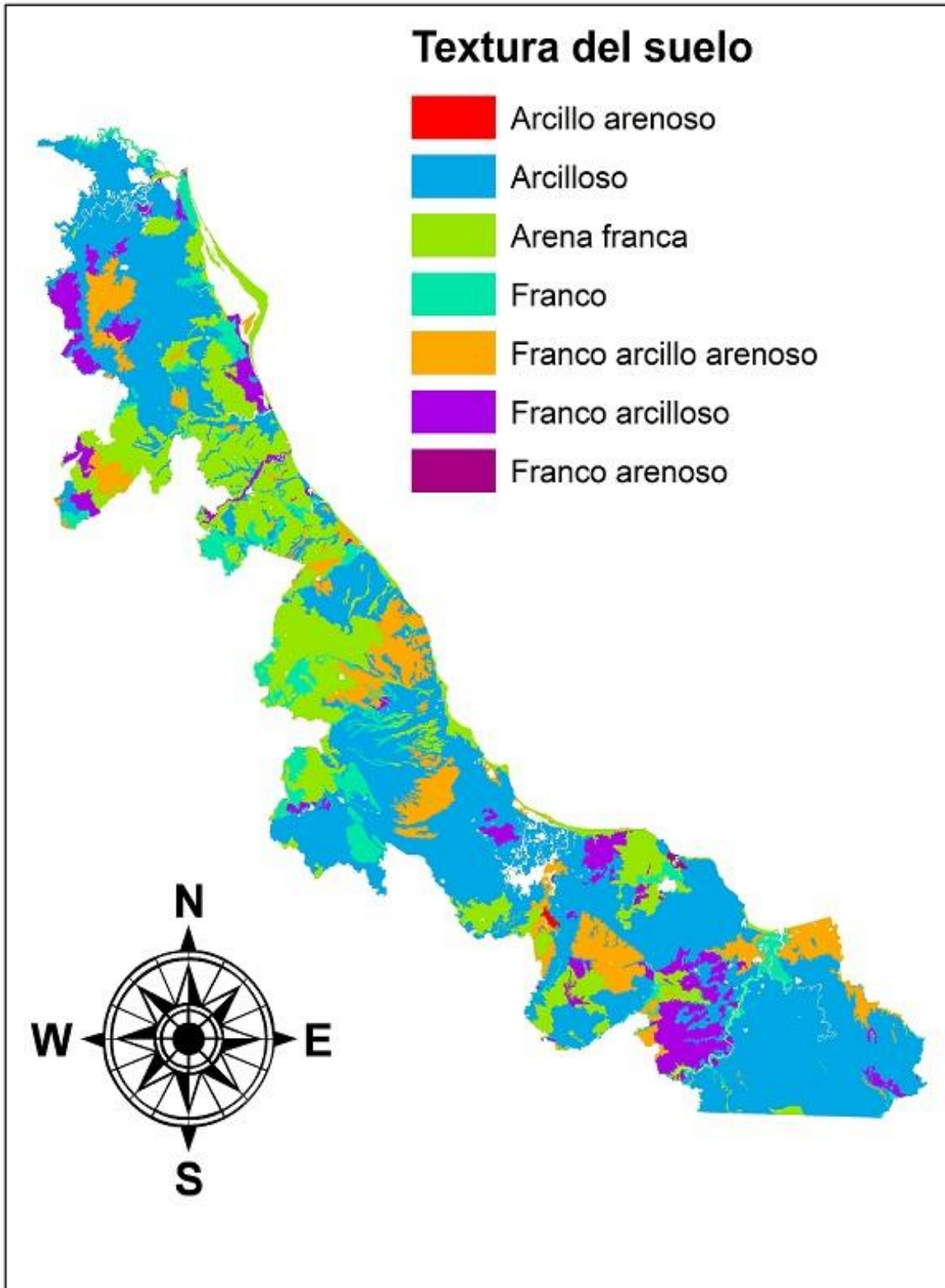
Anexo 4. Clasificación por temperatura del estado de Veracruz.



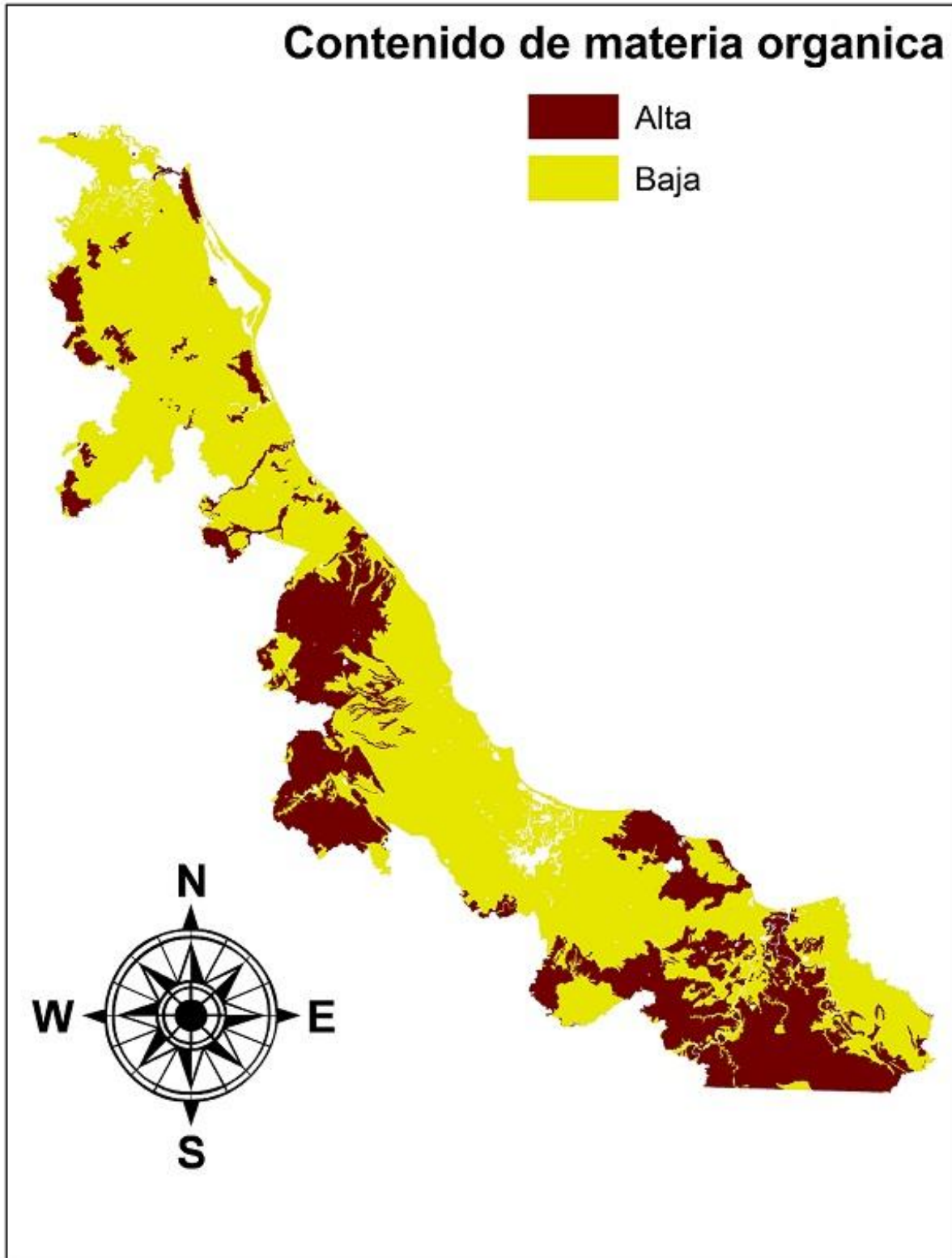
Anexo 5. Clasificación por profundidad del estado de Veracruz.



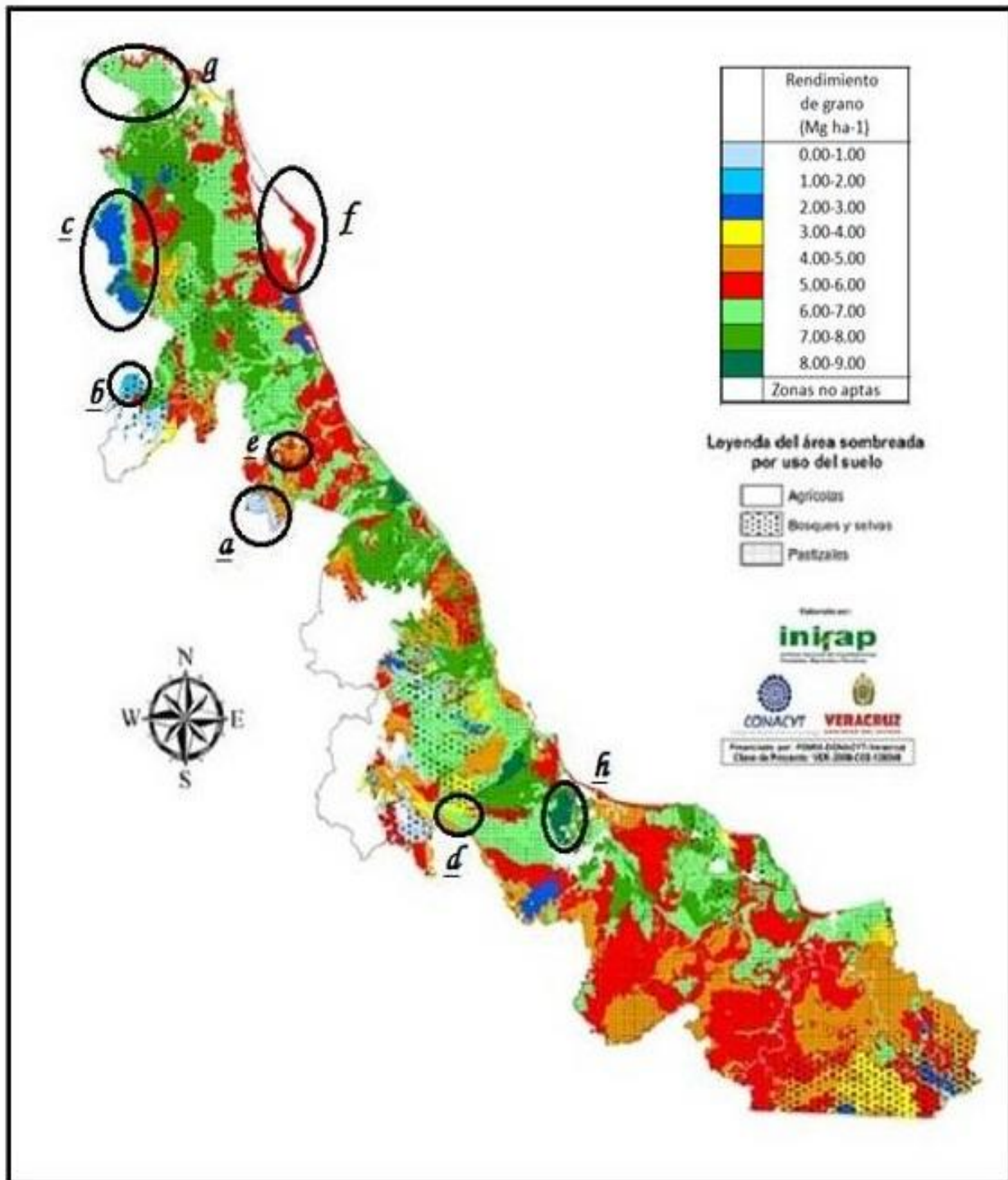
Anexo 6. Clasificación por textura de suelo del estado de Veracruz.



Anexo 7. Clasificación por contenido de M.O. en el suelo del estado de Veracruz.



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



## Anexo 9. Uso actual del suelo

Rendimiento de grano seco (t ha <sup>-1</sup> )	Área total (x1000 has)	%	Áreas agrícolas	Bosques y selvas	Pastizales	Cuerpos de agua y áreas urbanas	Área descartada
0-1	145	2.0	60	64	21	0	0
1-2	20	0.3	5	14	1	0	0
2-3	166	2.3	51	24	91	0	0
3-4	196	2.7	41	103	49	3	0
4-5	1,040	14.5	224	190	593	33	0
5-6	1,842	25.6	358	251	1,178	55	0
6-7	1,738	24.2	426	224	1,042	47	0
7-8	1,022	14.2	310	116	558	37	0
8-9	70	1.0	25	2	32	11	0
Área descartada	-	-	-	-	-	-	948
Total	6,239	86.8	1,500 (20.9%)	988 (13.7%)	3,565 (49.6%)	186 (2.6%)	948 (13.2%)