

**U N I V E R S I D A D D E L M A R**  
**Campus Puerto Ángel**



**"EVALUACIÓN DE LA APTITUD DEL TERRITORIO VERACRUZANO PARA LA  
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR, SORGO  
DULCE Y REMOLACHA AZUCARERA "**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Presenta:

**Ana Isabel Morales Rangel**

Director de Tesis: Dr. Jesús Uresti Gil

Puerto Ángel, Oaxaca, 2013

## Índice General

i	Índice de cuadros .....	iii
ii	Índice de figuras .....	iv
iii	Prólogo .....	v
	RESUMEN .....	vii
	ABSTRACT .....	viii
1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	MARCO TEÓRICO .....	3
2.1	Biocombustibles .....	3
2.2	Bioetanol y sus usos.....	4
2.2.1	Beneficios y riesgos del uso de bioetanol como biocombustible.....	5
2.2.2	Situación del bioetanol en el mundo y en México .....	7
2.2.3	Producción de bioetanol .....	9
2.3	Los cultivos energéticos.....	10
2.3.1	Caña de azúcar .....	11
2.3.2	Sorgo Dulce .....	13
2.3.3	Remolacha azucarera .....	14
2.4	Zonificación agroecológica.....	15
2.5	Sistema de información geográfica (SIG).....	16
2.6	Modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool) .....	17
3	ANTECEDENTES .....	18
4	JUSTIFICACIÓN.....	22
5	HIPÓTESIS .....	23
6	OBJETIVOS .....	23
6.1	Objetivo general .....	23
6.2	Objetivos particulares .....	23
7	MATERIAL Y MÉTODOS.....	24
7.1	Descripción del área de estudio.....	24
7.2	Actividades generales a realizar .....	27
7.3	Simulación del rendimiento de biomasa .....	27
7.3.1	El Modelo de simulación SWAT .....	27

---

7.3.2	Cartografía utilizada.....	29
7.3.3	Bases de datos.....	30
7.3.3.1	Suelos .....	30
7.3.3.2	Información Climática.....	31
7.3.3.3	Parámetros fisiológicos de los cultivos .....	32
7.3.3.4	Manejo agronómico de los cultivos.....	32
7.4	Estimación teórica de bioetanol.....	32
7.5	Cartografía del rendimiento de biomasa y bioetanol .....	32
7.6	Validación .....	33
7.7	Relación Rendimiento potencial y el Uso actual del suelo .....	33
7.8	Identificación de áreas recomendadas para producir biomasa .....	33
8	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	35
8.1	Cartografía del rendimiento de biomasa y bioetanol .....	35
8.1.1	Caña de azúcar .....	35
8.1.2	Sorgo Dulce .....	38
8.1.3	Remolacha azucarera .....	40
8.2	Validación .....	42
8.3	Relación del Rendimiento potencial y el Uso actual del suelo.....	44
8.4	Identificación de áreas recomendadas para producir biomasa .....	46
9	CONCLUSIONES .....	50
10	RECOMENDACIONES.....	52
11	LITERATURA CITADA .....	53
12	ANEXOS .....	61

**i Índice de cuadros**

<i>Cuadro 1.</i> Insumo y procesos para la generación de biocombustibles.....	4
<i>Cuadro 2.</i> Beneficios y riesgos del uso de Bioetanol como biocombustibles. ....	6
<i>Cuadro 3.</i> Producción de bioetanol en México y capacidad instalada.....	9
<i>Cuadro 4.</i> Principales cultivos, regiones y uso de agua en la producción de bioetanol.....	11
<i>Cuadro 5.</i> Estado actual de los aspectos generales para la producción de bioetanol en México. .....	11
<i>Cuadro 6.</i> Parámetros edafológicos requeridos por el SWAT. ....	30
<i>Cuadro 7.</i> Características del perfil típico del suelo Vertisol pélico (Vp) .....	30
<i>Cuadro 8.</i> Datos estadísticos mensuales requeridos por el modelo SWAT. ....	31
<i>Cuadro 9.</i> Tasa de conversión de producto - bioetanol.....	32
<i>Cuadro 10.</i> Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de caña de azúcar, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo.....	44
<i>Cuadro 11.</i> Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de sorgo dulce, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo .....	45
<i>Cuadro 12.</i> Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de remolacha azucarera, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo .....	45
<i>Cuadro 13.</i> Áreas considerada como aptas para los cultivos .....	46
<i>Cuadro 14.</i> Zonas de abastecimiento de 25 km para plantas productoras de bioetanol.....	49
<i>Cuadro 15.</i> Parámetros fisiológicos de los cultivos requeridos por el modelo SWAT.....	62
<i>Cuadro 16.</i> Manejo agronómico de Caña de azúcar .....	64
<i>Cuadro 17.</i> Manejo agronómico de Sorgo dulce .....	65
<i>Cuadro 18.</i> Manejo agronómico de Remolacha azucarera.....	66
<i>Cuadro 19.</i> Rendimientos promedio de caña de azúcar observados y simulados con el modelo SWAT en zonas de abastecimiento de los ingenios azucareros.....	67

## ii Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Producción mundial de bioetanol. (USA-DOE, 2010). .....	7
<i>Figura 2.</i> Estructura de la producción de energía primaria en México, 2004 (10,330.774 Petajoules). (SENER / BID / GTZ, 2006).....	8
<i>Figura 3.</i> Consumo energético nacional por sector. (SENER / BID / GTZ, 2006). .....	8
<i>Figura 4.</i> Proceso de producción de bioetanol (García y García, 2006). .....	10
<i>Figura 5.</i> Aplicaciones de la Zonificación agroecológica. (FAO, 1997).....	16
<i>Figura 6.</i> Área de estudio. Elaborado a partir de INEGI, 2005. ....	24
<i>Figura 7.</i> Distribución geográfica de a) climas, b) pendientes del terreno, c) suelo y d) uso de suelo del estado de Veracruz. Elaborados a partir de INEGI, 2005.....	26
<i>Figura 8.</i> Subcuencas y estaciones meteorológicas.....	28
<i>Figura 9.</i> Esquema de trabajo.....	29
<i>Figura 10.</i> Rendimiento promedio de caña de azúcar simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz.....	36
<i>Figura 11.</i> Rendimiento promedio de sorgo dulce simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz. ....	39
<i>Figura 12.</i> Rendimiento promedio de remolacha azucarera simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz. ....	41
<i>Figura 13.</i> Ubicación de los Ingenios Azucareros del estado de Veracruz.....	42
<i>Figura 14.</i> Comparación del rendimiento promedio de caña de azúcar observado y simulado con el modelo SWAT en las zonas de abastecimiento de los ingenios azucareros. ....	43
<i>Figura 15.</i> Zona de pastizal con rendimientos promedios superior a 70 t ha <sup>-1</sup> de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera, simulados por el modelo SWAT para el estado de Veracruz. ....	47
<i>Figura 16.</i> Áreas propuestas para establecer biorefinerías de bioetanol.....	48
<i>Figura 17.</i> Clases de suelo y superficie ocupada en el estado de Veracruz .....	61