



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN SUELOS
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

**INTRODUCCIÓN DE LEGUMINOSAS HERBÁCEAS COMO OPCIÓN
DE REHABILITACIÓN EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO**

TESIS

**Que como requisito parcial para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Presenta:

MAYRA CLEMENTINA ZAMORA ELIZALDE

Bajo la supervisión de:

DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

DR. PEDRO ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ



REGISTRACIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
FACULTAD DE EXAMENES PROFESIONALES



Chapingo, Estado de México, febrero de 2020

**INTRODUCCIÓN DE LEGUMINOSAS HERBÁCEAS COMO OPCIÓN DE
REHABILITACIÓN EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO**

Tesis realizada por **MAYRA CLEMENTINA ZAMORA ELIZALDE** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

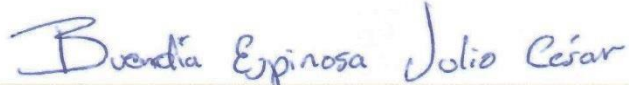
DIRECTOR: _____


DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ

CO DIRECTOR: _____


DR. PEDRO ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

ASESOR: _____


DR. JULIO CESAR BUENDÍA ESPINOZA

CONTENIDO

Lista de figuras.....	v
Lista de cuadros y tablas	vi
Agradecimientos	vii
Datos biográficos	viii
Resumen general.....	ix
General abstract	x
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. Revisión de literatura	3
3.1 Cambio de uso de suelo y vegetación	3
3.2 Degradación y rehabilitación de suelos	4
3.3 Especies para rehabilitación	5
3.3.1 <i>Macroptilium atropurpureum</i>	5
3.3.2 <i>Vicia sativa</i>	6
3.4 Modelación de nichos ecológicos	7
4. Literatura citada	10
5. Diagnóstico del uso del suelo y vegetación, en la microcuenca Tula, México	14
5.1 Resumen	14
5.2 Abstract.....	15
5.3 Introducción	15
5.4 Materiales y métodos.....	17
5.4.1 Área de estudio	17
5.4.2 Generación de cartográfica de uso de suelo	18
5.4.3 Construcción de las matrices de transición	19

5.4.4	Tasas de cambio	20
5.5	Resultados y discusión	20
5.5.1	Transiciones del cambio de uso de suelo	22
5.5.2	Tasas de cambio	26
5.6	Conclusiones	27
5.7	Literatura citada	28
6.	Evaluación de la adaptación de dos especies leguminosas mediante la modelación de sus nichos ecológicos en la microcuenca Tula, México.....	34
6.1	Resumen	35
6.2	Abstract.....	36
6.3	Introducción	37
6.4	Objetivos.....	39
6.5	Materiales y métodos.....	39
6.5.1	Localización del área de estudio	39
6.5.2	Obtención de datos de ocurrencia.....	40
6.5.3	Variables ambientales	41
6.5.4	Modelación con DIVA-GIS	42
6.5.5	Validación.....	43
6.6	Resultados y discusiones	44
6.7	Conclusiones	50
6.8	Referencias.....	50
7.	Anexo fotográfico.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama BAM, describe interacciones entre factores bióticos (B), abióticos (A) y de movimiento (M).....	8
Figura 2. Localización del área de estudio.....	17
Figura 3. Probabilidad de permanencia de uso de suelo del periodo 1992-2000.	23
Figura 4. Probabilidad de permanencia de uso de suelo del periodo 2000-2017.	25
Figura 5. Localización del área de estudio.....	40
Figura 6. Introducción de especies en Ejido San Felipe Teotitlán, México	43
Figura 7. Registro de ocurrencia de <i>V. sativa</i> y <i>M.atropurpurem</i>	45
Figura 8. Estados con registros georeferenciados de <i>V. sativa</i> y <i>M.</i> <i>atropurpurem</i> en México	46
Figura 9. Distribución potencial de <i>V. sativa</i> en la microcuenca Tula, México ..	48
Figura 10. Distribución potencial de <i>M. atropurpureum</i> en la microcuenca Tula, México	49
Figura 11. Reunión con ejidatarios de San Felipe Teotitlán, México	57
Figura 12. Recorrido en la microcuenca Tula para verificación de uso de suelo	57
Figura 13. Delimitación de parcela para implementación de experimento, en el Ejido de San Felipe Teotitlán, México.....	58
Figura 14. Preparación del terreno de la parcela experimental	58
Figura 15. Producción de plántula de <i>V. sativa</i> y <i>M. atropurpureum</i> en el invernadero de Zootecnia de la UACH.	59
Figura 16. Acarreo de plántula a San Felipe Teotitlán y plantación en parcela experimental.	59
Figura 17. Desarrollo de <i>V. sativa</i> y <i>M. atropurpureum</i> en campo durante los años 2018 y 2019.	60

LISTA DE CUADROS Y TABLAS

Cuadro 1. Características morfológicas del siratro	5
Cuadro 2. Características fisicoquímicas del siratro	6
Cuadro 3. Características fisicoquímicas del ebo.	7
Cuadro 4. Sistema jerárquico de clasificación del uso del suelo.....	19
Cuadro 5. Superficies del uso de suelo por categoría para los años: 1992, 2000, 2017.....	22
Cuadro 6. Matriz de transición para el periodo 1992-2000.	22
Cuadro 7. Matriz de transición 2000-2017.	24
Cuadro 8. Tasa de cambio de uso del suelo, 1992-2017.....	26
Cuadro 9. Descripción de procesos de cambio 1992-2000	27
 Tabla 1. Variables incorporadas en la modelación de los nichos ecológicos de <i>V. sativa</i> y <i>M. atropurpureum</i>	41
Tabla 2. Intervalos bioclimáticos de las zonas en las que se tiene registrada la presencia de <i>V. sativa</i> y <i>M. atropurpureum</i> en México.	46

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Departamento de Suelos por haberme brindado la oportunidad de ser su alumna, prepararme como ingeniera y ahora como maestra en ciencias, siempre estaré agradecida por formarme personal y profesionalmente.

A la Coordinación del posgrado de la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible por el apoyo para la realización de esta investigación.

A la Dra. Rosa María García Núñez por su confianza y apoyo en la realización de la presente investigación.

Al Dr. Pedro Arturo Martínez Hernández por el apoyo brindado a lo largo de esta investigación, además de su disposición y tiempo para ayudarme cuando tenía dudas y trabajo de campo.

Al Dr. Julio Cesar Buendía Espinoza, porque gracias a él, esta tesis tomó un mejor rumbo, agradezco el tiempo y disposición que me brindó a lo largo de este trabajo.

A todos mis profesores y administrativos de MCADS por sus enseñanzas y disposición

Y a los ejidatarios del Ejido San Felipe Teotitlán por su colaboración, en especial al Sr. Wilfrido y familia, por sus atenciones y colaboración en el trabajo de campo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Dirección: calle las Flores, Pob. Santa María Palapa, San Martín de las Pirámides, Estado de México.

Fecha de nacimiento: 23/noviembre/1995

Correo: zamora.elizalde.231195@gmailcom

Cedula profesional: 10927566



Formación académica

2001-2007 Acreditó la Educación primaria en la esc. “Margarita Maza de Juárez”; Santa María Palapa, Estado de México.

2007-2010 Acreditó la educación secundaria en la esc. Telesecundaria “Tomas Alva Edison”; Santa María Palapa, Estado de México.

2010-2013 Acreditó la educación media superior en la “Preparatoria Agrícola” de la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México.

2013-2017 Acreditó la educación superior en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México al cursar la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables.

2018-2019 Cursó la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México.

RESUMEN GENERAL

INTRODUCCIÓN DE LEGUMINOSAS HERBÁCEAS COMO OPCIÓN DE REHABILITACIÓN EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO¹

A nivel mundial, regional y local, existen factores que determinan el cambio de uso de suelo. En la microcuenca Tula se desconocen los factores que han generado el deterioro ambiental en el cual se encuentra. Este deterioro se ve reflejado en pérdida de suelo y reducción en la productividad, lo cual es necesario corregir. Por ello el objetivo de este trabajo fue evaluar la adaptación de las leguminosas *Macroptilium atropurpureum* [(Moc. & Sesse ex DC.) Urban] y *Vicia sativa* L. a partir de la modelación de sus nichos ecológicos para determinar su distribución potencial en la microcuenca Tula, México. Primeramente se diagnosticó la microcuenca mediante un análisis espacial, seguido por la modelación de nichos ecológicos de las dos leguminosas con la herramienta BIOCLIM del programa DIVA-GIS 7.5.0.

El diagnóstico sirvió como base para diseñar estrategias que permitan combatir el deterioro de sus recursos naturales, y de él se concluyó que en el periodo analizado (25 años), el área agrícola se incrementó un 33% y una pérdida de superficie forestal de 22%. Las tasas de cambio y probabilidad de permanencia indicaron que de continuar con la tendencia actual seguirán incrementándose las áreas agrícolas y los cuerpos de agua, así como el abandono de algunas superficies debido a su baja productividad.

Por otra parte, en la modelación de nichos se encontró que estas especies tienen un potencial muy bajo de distribución en esta región por lo que no se recomienda introducirlas en la microcuenca como una opción de rehabilitación ya que no tendrán un desarrollo óptimo. Para poder realizar rehabilitaciones de terrenos degradados es importante la selección de las especies a utilizar ya que su distribución potencial puede no coincidir con las áreas que se pretende rehabilitar.

Palabras clave: cambio de uso de suelo, modelación de nichos ecológicos, BIOCLIM, *Macroptilium atropurpureum*, *Vicia sativa*.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Mayra Clementina Zamora Elizalde

Director de tesis: Rosa María García Núñez

GENERAL ABSTRACT

INTRODUCTION OF HERBACEOUS LEGUMES AS REHABILITATION OPTION OF TULA, MEXICO MICRO-WATERSHED²

There are global, regional and local factors that determine the change in the land use. In the Tula micro-watershed, the factors that have generated the environmental deterioration in which it is found are unknown. This deterioration is reflected in soil loss and productivity reduction, which has to be reversed. Therefore, the objective of this study was to evaluate the adaptation of legumes *Macroptilium atropurpureum* [(Moc. & Sesse ex DC.) Urban] and *Vicia sativa* L. based on the modeling of their ecological niches to determine their potential distribution in the micro-watershed, Tula, Mexico. First, the micro-watershed, was diagnosed by spatial analysis, followed by the modeling of ecological niches of the two legumes with the BIOCLIM tool of the DIVA-GIS 7.5.0 program.

The diagnosis served as the basis for designing strategies to combat the deterioration of its natural resources, and it was concluded that in the period analyzed (25 years), the agricultural area increased by 33% and a loss of forest area of 22%. Exchange rates and probability of permanence indicated that continuing with the current trend will continue to increase agricultural areas and bodies of water, as well as the abandonment of some areas due to their low productivity.

On the other hand, in the modeling of niches it was found that these species have a very low distribution potential in this region, so it is not recommended to introduce them in the micro-watershed, as a rehabilitation option since they will not have an optimal development. To be able to carry out rehabilitations of degraded lands, it is important to select the species to be used since their potential distribution may not coincide with the areas that are intended to be rehabilitated.

Key words: change of land use, modeling of ecological niches, BIOCLIM, *Macroptilium atropurpureum*, *Vicia sativa*.

² Thesis Master of Science in Agroforestry for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Mayra Clementina Zamora Elizalde

Advisor: Rosa María García Núñez

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, regional y local existen factores que determinan el cambio del uso de suelo y de cobertura vegetal, como los ambientales, demográficos, socioeconómicos y socioculturales, que a su vez provocan deterioro ambiental y pérdida de la diversidad biológica (Velázquez et al., 2002). Para conocer los procesos que han llevado a esos cambios es necesario realizar un caracterización y diagnóstico de las diversas cubiertas de los sitios de interés. Actualmente se emplean sistemas de información geográfica como una herramienta que en complemento con trabajo de campo permiten conocer los usos del suelo y los cambios que se han dado a través del tiempo (García, Cedillo, Juan & Balderas, 2012).

En México el 65.3% del territorio nacional son tierras secas, es decir han presentado de forma recurrente pérdida del potencial productivo y el 34.8% de estas tierras secas son semisecas (Comisión Nacional Forestal & Universidad Autónoma Chapingo, 2013). En la región centro del país se encuentra la microcuenca Tula conformada por catorce municipios de tres estados de la República Mexicana, en la cual existen superficies deterioradas por la inadecuada utilización de sus recursos naturales donde resalta pérdida de la vegetación nativa, incremento de superficie agrícola, erosión, crecimiento de la población, entre otras. Por lo que es necesario realizar acciones para minimizar los impactos negativos (Loredo, 2005). Sin embargo, previo a la realización de acciones es necesario realizar un diagnóstico integral que incluya conocer el contexto social, la biodiversidad, los aspectos ambientales de la región y procesos que han llevado a la degradación (Gómez-Romero et al., 2012). Entre las acciones básicas para realizar la rehabilitación de áreas degradadas resalta el establecimiento de especies que proporcionen usos múltiples y se adapten a las condiciones ecológicas existentes.

Sin embargo, la selección de especies a utilizar, es un aspecto muy importante ya que estas deben ser tolerantes a las condiciones del sitio, se pueden

seleccionar especies nativas o exóticas y así construir modelos que ayuden en el proceso de rehabilitación o restauración de ecosistemas (De-la-Rosa-Mera & Monroy-Ata, 2006).

Existen diversas experiencias de rehabilitación entre las que destaca el estudio de Hernández (2013) quien promovió la rehabilitación de ambientes degradados en la montaña a través de leguminosas nativas *Leucaena esculenta*, *Acacia acatlensis* y *Lysiloma divaricata*. Las investigaciones sobre rehabilitación ecológica, para disminuir la degradación son escasos en México, por ello la necesidad de incrementar la investigación en este ámbito (Montaño & Monroy, 2000).

La modelación de nichos ecológicos sirve para obtener el área de distribución geográfica potencial de una especie, a partir de registros de ocurrencia y variables ambientales (Soberón, Osorio-Olvera & Peterson, 2017). Y son una herramienta que permiten tomar decisiones acerca de que especies seleccionar para introducir en un sitio determinado.

En la microcuenca Tula se encuentra el ejido de San Felipe Teotitlán que como gran parte del país presenta áreas degradadas. Motivo por el cual los pobladores de este ejido han expresado a las autoridades e instituciones interesadas su interés por volver sus tierras productivas. Por ello el objetivo del presente trabajo fue evaluar la adaptación de las leguminosas *Macroptilium atropurpureum* y *Vicia sativa* a partir de la modelación de sus nichos ecológicos para determinar su distribución potencial en la microcuenca Tula, México, con la finalidad de determinar el potencial de distribución de las especies y así decidir la pertinencia de su introducción en la microcuenca Tula como una opción para rehabilitar áreas degradadas.

Este estudio se divide en cuatro capítulos: en el primer capítulo se describe la problemática, antecedente y justificación, en el segundo capítulo se incluye un análisis del estado del conocimiento respecto al cambio de cobertura y uso de

suelo y modelación de nichos ecológicos. Finalmente, en el capítulo tres y cuatro se incluyen los artículos científicos derivados de la tesis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la adaptación de las leguminosas *Macroptilium atropurpureum* y *Vicia sativa* a partir de la modelación de sus nichos ecológicos para determinar su distribución potencial en la microcuenca Tula, México.

2.2 Objetivos específicos

1. Diagnosticar la situación actual de los cambios en la cobertura y el uso de suelo de la microcuenca Tula, México por medio del análisis espacial, para conocer sus principales procesos de cambio, y de esta manera contribuir al entendimiento del sistema.
2. Evaluar la distribución geográfica potencial de dos especies forrajeras en la microcuenca Tula, México a través de la modelación de su nicho ecológico para determinar si las especies se pueden emplear en el diseño de proyectos mejoradores en esta región.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Cambio de uso de suelo y vegetación

El cambio de uso de suelo de acuerdo a Rosete, Pérez, y Bocco (2008) se define como “La remoción total o parcial de la vegetación de los terrenos forestales para destinarlos a actividades no forestales”. Puede ser abordado de diferentes perspectivas, y ha estado en discusión bajo que enfoque es mejor abordar los cambios. En México se han realizado investigaciones sobre cambio de uso de suelo, en las cuales se han empleado una diversidad de metodologías: se han determinado tasas de cambio de uso de suelo (García et al., 2012; Pineda, Bosque, Gómez & Plata, 2009; Torres, Favela, Alanís &

González, 2018; Vega, Ruíz, Linares, Pérez & Tamariz, 2007). Mientras que otros estudios implican mayor complejidad y hacen predicciones (López, Bocco & Mendoza, 2001; Pérez-Miranda, Valdez, Moreno, González & Valdez, 2011; Rosete et al., 2008).

3.2 Degradación y rehabilitación de suelos

El suelo es material mineral no consolidado en la superficie de la tierra que se forma por procesos naturales físicos, químicos y biológicos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004; Zavala-Cruz, Palma-López, Fernández, López & Shirma, 2011).

En México y en el mundo el suelo sufre una degradación acelerada como consecuencia de la intervención antropogénica. Entendiendo como degradación: la pérdida temporal o permanente de la capacidad productiva biológica y económica del suelo (Zavala-Cruz et al., 2011). La degradación es resultante de dos factores principalmente: variaciones climáticas de larga y corta duración (sequía y ondas de calor) y actividades humanas (cambio de uso de suelo mediante deforestación para agricultura, ganadería y urbanización) (López, 2016). Los suelos afectados por las actividades humanas que presenten un deterioro en productividad requieren la implementación de actividades correctivas para rehabilitar el potencial de esos suelos (Zavala-Cruz et al., 2011). Entendiendo como rehabilitación la reparación de los procesos, la productividad y servicios de un ecosistema sin tener como objetivo producir el estado original, rehabilitación se puede usar para indicar cualquier acto de mejoramiento desde un estado degradado (Society for Ecological Restoration International, 2004; Vargas, 2015).

Las prácticas que se emplean para promover la calidad edáfica y la productividad del suelo generalmente son del tipo agronómicas o vegetativas como cultivos de cobertura, sistemas agroforestales y reforestación.

3.3 Especies para rehabilitación

Las herbáceas forrajeras son una opción para la rehabilitación y mejoramiento de ecosistemas degradados, ya que proporcionan una muy buena diversidad de usos entre los que resaltan el proporcionar forraje, fijación de nitrógeno, recuperación de suelo entre otros, sin embargo éstas deben adaptarse a las condiciones ambientales y desarrollarse en suelos degradados. A continuación se describen *Macroptilium atropurpureum* y *Vicia sativa* las cuales fueron seleccionadas para rehabilitar la microcuenca.

3.3.1 *Macroptilium atropurpureum*

Herbácea forrajera conocida comúnmente como siratro. Es perenne de corta vida, trepadora, rastrera y estolonífera. Esta especie se desarrolla preferentemente en suelos de textura delgada, aunque puede desarrollarse en un amplio rango de suelos, desde pH de 4.5 hasta 8.9; no soporta suelos con mal drenaje. Su temperatura óptima de crecimiento está entre 26.5 -30°C (Peters, Franco, Schmidt & Hincapié, 2010).

Se han evaluado las características fisicoquímicas del siratro en varias regiones del mundo de los cuales se obtuvieron altura que van de 7.3 a 22.7 cm y coberturas que van de 26.7 a 91.2% de dos regiones una tropical y otra semiárida (Cuadro 1) respectivamente (Alatorre-Hernández, Guerrero-Rodríguez, Olvera-Hernández, Aceves-Ruíz & Vaquera-Huerta, 2018; Njarui & Wandera, 2004).

Cuadro 1. Características morfológicas del siratro

	Altura (cm)	Cobertura (%)
Región semiárida de Kenia (12 semanas)	7.3	26.7
Región de trópico seco México (8 meses)	22.7	91.2

Fuente: Alatorre-Hernández et al. (2018); Njarui & Wandera (2004).

Se ha estimado materia seca (MS), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA) y digestibilidad *in vitro* en materia seca (DIMS) como se muestra en el Cuadro 2, de los cuales se ha obtenido valores de proteína cruda que van desde 13.1% en una zona semiárida hasta 15.8% en el trópico; y con 56.68% en DIMS en una zona de trópico y 65% en una zona semiárida, lo que indica que en zonas semiáridas FDN, FDA y DIMS son más altos que en zonas tropicales (Alatorre-Hernández et al., 2018).

Cuadro 2. Características fisicoquímicas del siratro

	MS (%)	FDN (%)	FDA (%)	PC (%)	DIMS (%)
Zonas semiáridas de Tanzania	-	59.8	47.2	13.1	65.3
S/L	22.3	45.91	36.18	18.5	63.93
Región de trópico seco Méx.	22.96	43.68	32.03	15.8	56.68

Materia seca (MS), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácida (FDA), proteína cruda (PC), digestibilidad *in vitro* en materia seca (DIMS).

Fuente: Alatorre-Hernández et al. (2018); Njarui & Wandera (2004).

3.3.2 *Vicia sativa*

Leguminosa anual conocida como como veza o ebo, de acuerdo a la literatura sus características morfológicas son hojas imparipinadas aunque con el foliolo terminal esta transformado en zarzillo. Es una especie tolerante a la sequía, aunque es relativamente exigente en precipitaciones durante su periodo vegetativo, a pesar de eso no soporta encharcamiento. Comúnmente es utilizada como forraje, abono verde y suele ser cultivada asociándola a maíz y frijol para recuperar la fertilidad del suelo (Zavala-Cruz et al., 2011).

Debido a su utilización como forraje es una especie que ha sido estudiada para conocer su valor nutricional. Entre los resultados obtenidos (Cuadro 3) se encuentran materia seca con valores que van desde 10.84 a 20.8% en promedio, el contenido de proteína bruta que va de 20.8 a 24.8%, fibra ácida

detergente con valores de entre 22.72 a 33.55 y 30% y de digestibilidad de materia seca que va de 61 a 70% las diferencias se deben a las características edáficas de los sitios (Treviño, Caballero & Gil, 2011).

Cuadro 3. Características fisicoquímicas del ebo.

Lugar	MS (%)	PB (%)	FDN (%)	FDA (%)	DIMO (%)
Madrid	-	20.8	40.7	29.6	66.9
Cantabria	10.84	26.13	50.02	33.55	61
Meseta sur, España	20.8	24.8	30.6	22.72	70.25

Materia seca (MS), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente acida (FDA), proteína cruda (PC), digestibilidad *in vitro* en materia orgánica (DIMO).

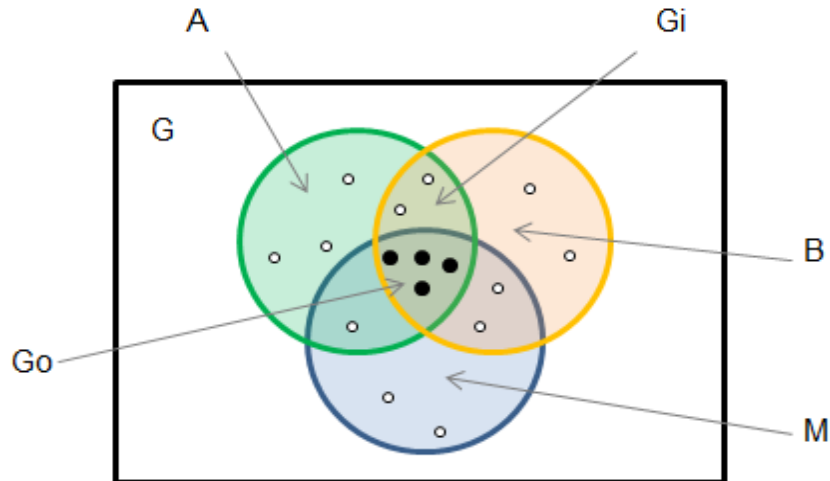
Fuente: Treviño (2011)

La información obtenida de las especies, indican que son opción como forraje.

3.4 Modelación de nichos ecológicos

Determinar la distribución potencial de una determinada especie implica la modelación de nichos ecológicos, y para entender la modelación es necesario comprender algunos términos comúnmente empleados, entre los que destacan áreas de distribución y nicho ecológico.

Las áreas de distribución de una especie son el resultado de una combinación de factores en un tiempo dado, los factores más relevantes son tres: bióticos, abióticos y áreas accesibles y se ilustran en el diagrama BAM (Figura 1), que es una representación abstracta del espacio geográfico (**G**) (Soberón, 2007; Soberón & Peterson, 2005):



A = variables scenopoéticas; B = variables bióticas; M = área accesible; Go = área ocupada; Gi= área invadible

Figura 1. Diagrama BAM, describe interacciones entre factores bióticos (B), abióticos (A) y de movimiento (M)

Las variables scenopoéticas (A) son variables no interactivas con la especie (variables ambientales) (Soberón, 2007). La letra B, representa la región del mundo con un ambiente biótico adecuado para el desarrollo de la especie, el área accesible (M) es aquella que la especie ha explorado (Soberón & Peterson, 2005). El área ocupada Go es la parte del mundo que tiene las condiciones bióticas y ambientales favorables y que además ha sido explorada por la especie (Soberón & Nakamura, 2009) y al área invadible (Gi) es aquella zona con condiciones ambientales y bióticas favorables que no ha sido invadida.

Estrechamente relacionado con áreas de distribución está el término de nicho ecológico, el cual tiene numerosas definiciones. El concepto básicamente se refiere a un subconjunto de aquellas condiciones ambientales que afectan a una población de una determinada especie, permitiendo que sobreviva y tenga una tasa de crecimiento positiva (Kearney, 2006; Soberón & Nakamura, 2009). Existen nichos Eltonianos y nichos Grinnellianos, para la modelación de nichos se consideran los nichos Grinnellianos. Estos nichos son compuestos por variables scenopoéticas. Hay tres clases de nichos Grinnellianos: el

fundamental, fundamental existente y el realizado (Guisan & Zimmermann, 2000; Soberón & Peterson, 2005). Cuando los efectos de las interacciones bióticas se excluyen en los cálculos de los efectos de las dimensiones de nicho en la aptitud física, y solo se empleen las condiciones scenopoéticas, se obtiene el nicho fundamental (Kearney, 2006; Soberón, 2007). El nicho fundamental existente es el formado por la intersección del nicho fundamental con el espacio de variables ambientales existentes y cuando las interacciones bióticas se incluyen en el cálculo del nicho, se obtiene el nicho realizado (Kearney, 2006; Soberón, 2007; Soberón, 2010).

Determinar en donde se encuentran las condiciones ambientales para que una determinada especie prospere se logra a través de la modelación de nichos ecológicos (MNE) y la modelación de áreas de distribución (SDM), las cuales son un campo nuevo de investigación con un alto crecimiento en los últimos 15 años (Kearney, 2006; Lobo, Jiménez-Valverde & Horta, 2010, Soberón, 2007). Los MNE se utilizan para identificar lugares adecuados para la supervivencia de las poblaciones de determinada especie a partir de la identificación de sus requisitos ambientales (Soberón & Nakamura, 2009).

Existe una considerable cantidad de MNE, los cuales se clasifican en base a los tipos de algoritmos, las categorías de estos son: estadísticos de regresión, de funciones envolventes, de distancia, de entropía máxima y de algoritmos genéticos (Elith & Leathwick, 2009). La modelación de nichos se puede realizar empleando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Lagos et al., 2013; Palma-Ordaz & Delgadillo-Rodríguez, 2014). El programa de DIVA-GIS, Maxent y NicheA permite modelar nichos ecológicos en base a información ambiental disponible de sitios en donde se ha observado una especie determinada (puntos de ocurrencia).

Se han realizado diversos estudios para determinar la distribución geográfica de especies entre las que se encuentra el de Reynoso et al. (2018) con *Pinus pseudostrobus* y *P. ocarpa*, Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte, y Jaramillo-Correa (2016) con ocho especies y dos variedades del género *Abies*

(*A. concolor*, *A. durangensis* var. *durangensis*, *A. durangensis* var. *coahuilensis*, *A. flincki*, *A. guatemalensis*, *A. hickelii*, *A. jaliscana*, *A. religiosa* y *A. vejari*) y Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez (2014) con ocho especies exóticas de carácter invasor *Atriplex semibaccata*, *Brassica tournefortii*, *Bromus rubens*, *Centaurea melitensis*, *Cynodon dactylon*, *Salsola tragus*, *Schismus barbatus* y *Tamarix ramosissima*.

4. LITERATURA CITADA

- Alatorre-Hernández, A., Guerrero-Rodríguez, J. D., Olvera-Hernández, J. I., Aceves-Ruíz, E., & Vaquera-Huerta, S. (2018). Productividad, características fisicoquímicas y digestibilidad en vitro de leguminosas forrajeras en trópico seco de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9, 296-315, doi: 10.22319/rmcp.v9i2.4361.
- Comisión Nacional Forestal & Universidad Autónoma Chapingo. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación*. Consultada en <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/06/linea-base-nacional-de-degradaci%C3%B3n-de-tierras-y-desertificacion.pdf>
- De-la-Rosa-Mera, C. J., & Monroy-Ata, A. (2006). Mosaicos de vegetación para la restauración ecológica en una zona semiárida. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 9, 96-100.
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677-697, doi: 10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159.
- García O, J. A., Cedillo G, J. G., Juan P, J. I., & Balderas P, M. Á. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, 1, 63-73.
- Gómez-Romero, M., Soto-Correa, J. C., Blanco-García, J. A., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., & Linding-Cisneros, R. (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencias*, 46, 795-807.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147-186, doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9.
- Hernández C, E. (2013). *Evaluación de los sistemas agroforestales con leguminosas nativas en la restauración del suelo en la montaña de*

Guerrero, México. (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México). Consultada en <http://132.248.9.195/ptd2013/diciembre/0706605/0706605.pdf>

- Kearney, M. (2006). Habitat, environment and niche: what are we modeling?. *Oikos*, 115, 186-191, doi: 10.1111/j.2006.0030-1299.14908.x.
- Lagos B, T. C., Ordóñez J, H., Castillo M, Á., Navia E, J., Lagos S, L., Benavides C, C., ..., López G, D. J. (2013). Distribución geográfica actual y potencial de balso blanco *Heliocarpus americanus* L. en el Departamento de Nariño. *Revista de ciencias agrícolas*, 30, 45-59.
- Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Horta, J. (2010). The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modelling. *Ecography*, 33, 103-114, doi: 10.1111/j.11/j.1600-0587.2009.06039.x.
- López G, E. M., Bocco, G., & Mendoza C, M. E. (2001). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 1, 56-76.
- López S, A. (2016). Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México?. *Terra Latinoamericana*, 34, 239-249.
- Loredo O, C. (2005). *Prácticas para la conservación del suelo y agua en zonas áridas y semiáridas*. México: INIFAP-CIRNE-Campo Exp. San Luis.
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (*Pinaceae*) en México: algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94, 5–24, doi: 10.17129/botsci.508.
- Montaño A, N. M., & Monroy A, A. (2000). Conservación ecológica de suelos en zonas áridas y semiáridas de México. *Ciencia y Desarrollo*, 26, 27-37.
- Njarui, D. M., & Wandera, F. P. (2004). Effect of cutting frequency on productivity of five selected herbaceous legumes and five grasses in semi-arid tropical Kenya. *Tropical Grasslands*, 38, 158–166.
- Palma-Ordaz, S., & Delgadillo-Rodríguez, J. (2014). Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92, 587-597, doi: 10.17129/botsci.135.
- Pérez-Miranda, R., Valdez L, J. R., Moreno S, F., González H, A., & Valdez H, J. I. (2011). Predicción espacial de cambios del uso de suelo en Texcoco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2, 59–72.

- Peters, M., Franco, L. H., Schmidt, A., & Hincapié, B. (2010). *Especies forrajeras multipropósito: opciones para productores del trópico americano*. Consultada en https://ciatlibrary.ciat.cgiar.org/forrajes_tropicales/pdf/Books/Especies%20Forrajeras%20MultipropositoTropico%20Americano.pdf
- Pineda J, N. B., Bosque S, J., Gómez D, M., & Plata R, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 1, 33-52.
- Reynoso S, R., Pérez H, M. J., López B, W., Hernández R, J., Muñoz F, H. J., Cob U, J. V., & Reynoso S, M. D. (2018). El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9, 47–68, doi: 10.29298/rmcf.v8i48.114.
- Rosete V, F. A., Pérez D, J. L., & Bocco, G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas*, 1, 39–58.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Perspectivas del medio ambiente en México, GEO México*. Consultada en [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8986/-Perspectivas del medio ambiente en M%C3%A9xico - GEO M%C3%A9xico- 2004GEO Mexico 2004 1.pdf.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8986/-Perspectivas%20del%20medio%20ambiente%20en%20M%C3%A9xico%20-%20GEO%20M%C3%A9xico%202004%201.pdf.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10, 1115–1123, doi: 10.1111 / j.1461-0248.2007.01107.x.
- Soberón, J. M. (2010). Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*, 33, 159–167, doi: 10.1111/j.1600-0587.2009.06074.x.
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas : concepts , methods , and assumptions. *PNAS*, 1, 1–7, doi: 10.1073 / pnas.0901637106.
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of model of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1–10, doi: 10.17161/bi.v2i0.4.
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución.

Revista Mexicana de Biodiversidad, 88, 437–441, doi: 10.1016/j.rmb.2017.03.011.

Society for Ecological Restoration International. (2004). *Principios de SER Internacional sobre la restauración ecológica*. Consultada en https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/SER_Primer/ser-primer-spanish.pdf

Torres B, M., Favela L, S., Alanís F, G., & González R, J. I. (2018). Dinámica de uso de suelo en una Región Hidrológica Prioritaria de la cuenca Río Bravo, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9, 54–79, doi: 10.29298/rmcf.v9i46.136.

Treviño, J., Caballero, R., & Gil, J. (2011). Estudio comparado de la composición química, digestibilidad y valor energético de diferentes cultivares y poblaciones de veza. *Pastos*, 9, 140–149, doi: 10.1057/fr.2011.36.

Vargas, O. (2015). *Los pasos fundamentales en la restauración ecológica*. Consultada en <http://observatorioirsb.org/web/wpcontent/uploads/2015/11/restauracion-ecologica.pdf>

Vega C, R., Ruiz C, J., Linares F, G., Pérez A, R., & Tamariz F, V. (2007). Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*, 64, 75–89.

Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz G, J. R., Mayorga S, R., Alcántara, P. C., Castro, R., ... Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 1, 21-37.

Zavala-Cruz, J., Palma-López, D. J., Fernández C, C. R., López C, A., & Shirma T, E. (2011). *Degradación y conservación de suelos en la cuenca del Río Grijalva, Tabasco*. Tabasco, México: Colegio de Postgraduados, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental y PEMEX.

5. DIAGNÓSTICO DEL USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN, EN LA MICROCUENCA TULA, MÉXICO

Mayra Clementina Zamora Elizalde¹, Julio Cesar Buendía Espinoza (<https://orcid.org/0000-0002-7939-8861>)², Pedro Arturo Martínez Hernández³, Rosa María García Nuñez⁴

¹Alumna de la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México.

²Autor para correspondencia. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México. jcbuendiae@hotmail.com

³Posgrado en producción animal. Departamento de Zootecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México.

⁴Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México.

5.1 Resumen

Los cambios en el uso de suelo y la cobertura vegetal son el componente principal en el deterioro a escala global, regional y local, y han sido documentados como el segundo problema ambiental a nivel global. En México, hay pocas políticas de planificación en el desarrollo territorial de los municipios y una deficiente toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales, ejemplo de ello es la microcuenca Tula. Por lo que el presente trabajo de investigación tiene como objetivo diagnosticar la situación actual y los cambios en la cobertura y uso de suelo de la microcuenca Tula, México por medio del análisis espacial, para conocer sus principales procesos de cambio, con el propósito de diseñar estrategias que permitan un manejo sustentable de sus recursos naturales. El análisis espacial se realizó a partir de imágenes satelitales Landsat (1992, 2000 y 2017) mediante sistemas de información geográfica. Para identificar los cambios se

aplicaron tabulaciones cruzadas y se estimaron las tasas de cambio. En el periodo analizado (25 años), el área agrícola se incrementó un 33% y una pérdida de superficie forestal de 22 %. Las tasas de cambio y probabilidad de permanencia indicaron que de continuar con la tendencia actual seguirán incrementándose las áreas agrícolas y los cuerpos de agua, así como el abandono de algunas superficies debido a su baja productividad.

Palabras clave: sistemas de información geográfica, matrices de transición, cambio de uso de suelo y vegetación.

5.2 Abstract

The changes in land use and vegetation cover are the main component in the deterioration at global, regional and local levels, and have been documented as the second global environmental problem. In Mexico, there are few planning policies in the territorial development of the municipalities and a poor decision-making in the management of natural resources, an example of which is the Tula microwatershed. Therefore, this research work aims to diagnose the current situation and the changes in the coverage and land use of the Tula microwatershed, through spatial analysis, to know its main processes of change, with the purpose of designing strategies that allow a sustainable management of its natural resources. The spatial analysis was made from Landsat satellite images (1992, 2000 and 2017) using geographic information systems. To identify the changes, cross-tabulations were applied and exchange rates were estimated. In the analyzed period (25 years), the agricultural area increased by 33% and a loss of forest area of 22%. Exchange rates and probability of permanence indicated that if the current trend continues, agricultural areas and water bodies would continue to increase, as well as the abandonment of some areas due to their low productivity.

Keywords: geographic information systems, transition matrices, change of land and vegetation use.

5.3 Introducción

El cambio de uso de suelo y la cobertura vegetal son el componente principal en el deterioro a escala global, regional y local, y han sido documentados como el segundo problema ambiental a nivel global

(Xiao *et al.*, 2006) Durante décadas, las actividades humanas y la demanda por bienes y servicios han generado presión sobre los recursos naturales con grandes impactos, la mayoría de ellos negativos, los cuales son difíciles de revertir (Rosete *et al.*, 2008; Reynoso *et al.*, 2015). México es un país con alta diversidad biológica y cultural, con altas tasas de deforestación y explotación de recursos naturales (FAO, 2016; Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018). La pérdida y degradación de la vegetación en una cuenca o microcuenca, así como la velocidad en que ocurren dichos cambios alteran las funciones y el correcto funcionamiento del intercambio de materia y energía (Cuevas *et al.*, 2011). En consecuencia, es necesario analizar los cambios en las coberturas vegetales para desarrollar estrategias que mitiguen el impacto negativo en los recursos naturales (Leija-Loredo *et al.*, 2018). En las últimas décadas, los catorce municipios que conforman a la microcuenca Tula, han tenido un crecimiento poblacional promedio anual de 2 %, alcanzando una población de 288,196 en el 2010 y una densidad aproximada de 278 habitantes/km² (INEGI, 2013). La densidad de población se incrementó de 205 a 236 habitantes/km² en el periodo de 1990 a 2000 (INEGI, 1990; INEGI, 2000) y con ello la demanda de bienes y servicios por la sociedad, así como los problemas asociados al cambio de uso suelo debido a la presión sobre los recursos naturales. El aumento de la zona urbana ha sido sin orden, abarcando áreas de uso agrícola y forestal.

La extracción de materiales para la construcción (uso minero) se ha incrementado en superficies agrícolas, forestales y zonas cercanas a los centros urbanos (INEGI, 2017 a; INEGI, 2017 b; INEGI, 2017 c). Lo anterior es producto de las insuficientes políticas de planificación en el desarrollo territorial de los municipios, y de la deficiente toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales. Por todo esto, la necesidad de analizar los cambios que se han dado en la microcuenca Tula, pero además, es un territorio políticamente complejo debido a que está conformado por tres estados, lo que implica políticas estatales diferentes.

Por consiguiente, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo diagnosticar la situación actual de los cambios en la cobertura y el uso de suelo de la microcuenca Tula, México por medio del análisis espacial, para conocer sus principales procesos de cambio, y de esta manera contribuir al entendimiento

del sistema, con el propósito de diseñar estrategias que permitan un manejo sustentable de sus recursos naturales.

5.4 Materiales y métodos

5.4.1 Área de estudio

La microcuenca Tula está enmarcada dentro de las coordenadas geográficas: 19°55'31.05'' y 19°34'28.74'' latitud norte y 98°39'59'' y 98°28'16.39'' latitud oeste (Figura 2); cuenta con una superficie de 103,766 ha y abarca territorio de los municipios: Calpulalpan, Sanctorum de Lázaro Cárdenas, Benito Juárez, Almoloya, Apan, Emiliano Zapata, Singuilucan, Tepeapulco, Villa de Tezontepec, Tlanalapa y Zempoala del Estado de Hidalgo, Axapusco y Nopaltepec del Estado de México y Temascalpa del Estado de Tlaxcala. Además, ésta se encuentra inmersa en la cuenca del río Panuco, dentro de la provincia fisiográfica del eje neovolcánico. Presenta un rango altitudinal de los 2333 a los 3223 msnm, la precipitación media anual es de 600 mm, y los tipos de suelo predominantes son feozem, cambisol, litosol, regosol y vertisol (INEGI, 2017 a; INEGI, 2017 b; INEGI, 2017 c), hay diferentes tipos de vegetación entre los que destacan Bosque de táscate, bosque de pino, bosque de encino, matorral crasicaule (INEGI, 2017 d).



Figura 2. Localización del área de estudio.

De acuerdo a López *et al.* (2001), para analizar el proceso de cambio de uso y cobertura del suelo, es necesario aplicar tres etapas: a) elaboración e interpretación cartográfica y digital de cambio, b) análisis de patrones de cambio de cobertura y uso de suelo y c) análisis de causas de cambio.

5.4.2 Generación de cartográfica de uso de suelo

La generación de cartografía corresponde a la primera etapa para realizar el análisis de proceso de cambio. De acuerdo a Bautista *et al.* (2011) en esta etapa es necesario seleccionar y adquirir las imágenes satelitales que se trabajaran, posteriormente se les debe realizar un tratamiento digital estándar (corrección geométrica, radiométrica y atmosférica). Después sigue la transformación de imágenes, en donde se clasifica la imagen, a partir de la asociación de elementos observados en la imagen a determinadas categorías temáticas, previo a la clasificación se debe determinar el sistema clasificatorio y finalmente realizar la evaluación de las bases digitales geográficas (Bautista *et al.*, 2011; Rosete *et al.*, 2008).

La generación de la cartografía de cobertura y uso del suelo en este estudio consistió en: a) seleccionar tres imágenes satelitales: Landsat-5 TM (04/12/1992), Landsat-7 ETM + (02/12/2000) y Landsat-8 OLI TIRS (23/11/2017) con una resolución de 30 metros y un nivel de procesamiento L1TP, b) corregir radiométrica y atmosféricamente éstas mediante la extensión ATCOR 2 Workstation del programa ERDAS IMAGINE, para asegurar una comparación estandarizada de datos entre ellas (Chander *et al.*, 2009; Vargas-Sanabria y Campos-Vargas, 2018), c) determinar las áreas de entrenamiento en donde se establecieron ocho categorías de estudio correspondientes a las coberturas de tierra: cuerpo de agua, zona urbana, área forestal, agricultura de temporal, agricultura permanente, matorral crasicaule, vegetación secundaria y área sin vegetación aparente (Velázquez *et al.*, 2002), d) aplicar el algoritmo de clasificación supervisada Maximum Likelihood a cada imagen, en el software ArcMap 10.5. (Vargas-Sanabria y Campos-Vargas, 2018), y e) validar la clasificación de la cobertura vegetal y uso de suelo para el año 1992 y 2000 a través de su comparación contra las capas de cobertura de uso de suelo y vegetación del INEGI de la serie II y III, respectivamente; mientras que para validar la cobertura del 2017, ésta se hizo mediante el establecimiento de puntos de control dentro del área de estudio, utilizando Google Earth® (Earth Google, 2018), y recorridos de campo a dichos puntos, con el propósito de corroborar el tipo de

cobertura correspondiente al sitio de entrenamiento (Torres *et al.*, 2018). Después se procedió a homogeneizar a 30 m el tamaño de pixel de cada uno de los mapas de uso de suelo: 1992, 2000 y 2017, y reclasificar éstos con base en el sistema jerárquico propuesto por Velázquez *et al.* (2002) (Cuadro 4) para lograr un sistema de clasificación jerárquico y homogéneo.

Cuadro 4. Sistema jerárquico de clasificación del uso del suelo.

No.	Clase	Tipo de vegetación y uso de suelo
1	CA	Cuerpo de agua
2	ZU	Zona urbana
3	AF	Área forestal (baja, media y alta densidad) y vegetación secundaria
4	AA	Agricultura de temporal y permanente
5	ASVA	Área sin vegetación aparente (matorral, minas, áreas erosionadas)

CA = cuerpo de agua; ZU = zona urbana; AF = área forestal; AA = área agrícola; ASVA = área sin vegetación aparente.

5.4.3 Construcción de las matrices de transición

Para la etapa de análisis de patrones de cambio de cobertura y uso de suelo se construyeron matrices de matrices de transición, que se describen como tablas con arreglos simétricos que contienen en las filas los tipos de vegetación y usos del suelo en el primer año o año base y en las columnas estos mismo tipos pero del segundo año. Cada celda de la diagonal principal de dicha matriz representa la superficie en hectáreas de cada clase de cobertura vegetal y uso del suelo que permaneció en la misma categoría durante el período considerado, mientras que en el resto de las celdas se estima la superficie de una determinada cobertura o tipo de uso del suelo que pasó a otra categoría (Dirzo y Masera, 1996 citado por López *et al.*, 2001) lo que permite entender la dinámica de cambio en la cobertura y uso de suelo a nivel local y/o regional. De los mapas en formato shapefile obtenidos de la reclasificación de cobertura vegetal y uso del suelo de 1992, 2000 y 2017, se construyeron las matrices de transición, realizando los siguientes pasos: a) generar matrices de transición entre las distintas categorías mediante una tabulación cruzada (Eastman, 2012), a partir del módulo Crosstab de TerrSet, para los periodos: 1992-2000 y 2000-2017, b) elaborar

matrices de probabilidad de pertenencia para cada clase en cada periodo con las matrices de transición; estas matrices se generan de dividir cada una de las celdas de la matriz de transición entre el total de la superficie de la clase analizada (Vega *et al.*, 2007), y c) estimar la probabilidad de pertenencia (P_{ij}) de cada clase de la matriz, la cual es proporcional a la superficie remanente de la misma clase entre el año 1 y el año 2. Su expresión matemática (Sánchez *et al.*, 2004) es:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij} (\text{año 1})}{S_j (\text{años 2})}$$

donde: S_{ij} =superficie del elemento ij de la matriz de transición de la cobertura y uso de suelo en el año 1;

S_j =superficie de la clase de uso del suelo j en año 2; y $\sum P_{ij} = 1$ para cada categoría de uso de suelo j .

De acuerdo con Sánchez *et al.* (2004), la probabilidad de pertenencia se interpreta de la siguiente manera: 0-33% (baja), 34-66%(media) y 67-100%(alta).

5.4.4 Tasas de cambio

Los procesos de cambio de uso del suelo se determinan con la cartográfica resultante de la tabulación cruzada, y se clasifican: en sin cambio, conservada, urbanización, transición, uso antrópico, deforestada, degradada y por actividad productiva (Rosete *et al.*, 2008; Cuevas *et al.*, 2011). Estos se estimaron mediante la ecuación propuesta por (FAO, 1996):

$$\delta_n = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Donde: δ_n = tasa de cambio promedio anual para la clase i en el n -esimo período evaluado (para expresar en % multiplicar por 100); S_1 = superficie total de la clase i en el período 1; S_2 = superficie total de la clase i entre el período 2, y n = número de años entre los dos periodos evaluados.

5.5 Resultados y discusión

En el Cuadro 5 se muestran los resultados obtenidos de las superficies del uso de suelo por categoría, para cada uno de los años: 1992, 2000 y 2017. De las 103,766.48 ha que componen la superficie total bajo estudio, en 1992, el uso de suelo estuvo dominado principalmente por el área forestal y agrícola, con cerca del 80 %, mientras que superficie restante fue ocupada por cuerpos de agua, zona urbana, y áreas sin

vegetación aparente, con cerca del 20 %. Sin embargo, a partir del año 2000 con respecto al año 1992, el área forestal disminuyó significativamente su superficie, en alrededor del 55 %; en contraste la superficie agrícola incremento aproximadamente 84 %. El resto de la superficie se redujo en un 25 %. Cabe mencionar que la deforestación se debió principalmente a que no existían leyes que regularan el aprovechamiento forestal a ningún nivel de gobierno y a la falta de políticas para reforestar y restaurar áreas forestales degradadas (PEF, 1989; PEF, 1995; Merino-Pérez y Segura-Wamholtz, 2002). Finalmente, el cambio del uso del suelo del 2017 con respecto al 2000, la superficie agrícola aumento igual que en el período anterior, solo que ahora en un 7 %; esta tendencia coincide con lo expuesto por Cuevas *et al.* (2011), quienes mencionan que la agricultura es la actividad que más hectáreas incorpora. Respecto a la superficie forestal, ésta presentó un incremento del 2%, pero el área sin vegetación aparente disminuyó en 178%. El incremento forestal se debe a que a partir del sexenio de 2000-2006 se hicieron modificaciones, empezando por la descentralización de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en el año 2001 lo que impulso programas de reforestación; además, en el año 2003, entro en vigor la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable (SEMARNAT, 2003; Del Angel-Mobarak, 2012). Es importante destacar que el mayor incremento en la superficie reforestada se dio en el territorio del estado de Hidalgo, debido por un parte, la implementación de políticas estatales entre las que destacan la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable para Hidalgo que entro en vigor, en el 2006, y decretar áreas naturales protegidas de competencia estatal, como la reserva estatal Cerros La Paila-El Xihuingo, en el año 2009, ubicada dentro de la microcuenca Tula; por otra, las múltiples reforestaciones anuales que se realizan en este estado (SADR, 2005; GEH, 2006). Adicionalmente, en el Cuadro 5, también muestra la tasa de cambio tanto en hectáreas como en porcentaje por clase de cobertura vegetal, para el período 1992-2017. Es decir, las clases: área forestal, zona urbana, y área sin vegetación disminuyeron su superficie en 23,077.95, 334.14 y 11,300.64 hectáreas que equivalen a 22.2, 0.3 y 10.9 %, respectivamente. Mientras que, área agrícola y cuerpos de agua incrementaron en 34,639.14 y 68.88 ha que equivalen a 33.4 y 0.1 %, respectivamente.

Cuadro 5. Superficies del uso de suelo por categoría para los años: 1992, 2000, 2017.

Clase	1992		2000		2017		1992-2017	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
CA	652.48	0.6	472.95	0.5	722.36	0.7	+ 68.88	+ 0.1
ZU	6244.63	6.0	6638.49	6.4	5911.49	5.7	- 334.14	- 0.3
AF	46339.27	44.7	21023.28	20.3	23261.82	22.4	- 23077.95	- 22.2
AA	35793.97	34.5	66102.39	63.7	70433.61	67.9	+ 34639.14	+ 33.4
ASVA	14736.13	14.2	9528.66	9.2	3436.49	3.3	- 11300.64	- 10.9
Total	103766.48	100.0	103766.77	100.1	103766.77	100.0		

CA = cuerpo de agua; ZU = zona urbana; AF = área forestal; AA = área agrícola; ASVA = área sin vegetación aparente.

5.5.1 Transiciones del cambio de uso de suelo

En el Cuadro 6 y en la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos de las matrices de transición y las probabilidades de pertenencia entre categorías, para el periodo de 1992 a 2000. El 54% $\left(\frac{416.57+2499.89+\dots+3509.96}{103766.48} = 53.47\%\right)$ de la cobertura vegetal de la microcuenca Tula permaneció sin cambio alguno, mientras que el 46% restante presentó algún cambio (Cuadro 6). De acuerdo con la Figura 3, del 100 % del área agrícola que había en el año 1992, el 89% $\left(\frac{31781.21}{35793.97} = 88.79\%\right)$ permaneció en el año 2000 siendo la única categoría con alta probabilidad de permanencia, y el 11 % cambió a zona urbana $\left(\frac{936.05}{35793.97} = 2.62 \%\right)$, área forestal $\left(\frac{1213.07}{35793.97} = 3.39 \%\right)$, área abandonada o sin vegetación $\left(\frac{1855.76}{35793.97} = 5.18 \%\right)$, y cuerpos de agua $\left(\frac{7.88}{35793.97} = 0.02 \%\right)$.

Cuadro 6. Matriz de transición para el periodo 1992-2000.

Superficie (ha)		2000					
1992	CA	ZU	AF	AA	ASVA	Total	
CA	416.57	37.49	36.77	124.61	37.04	652.48	

Superficie (ha)		2000				
1992	CA	ZU	AF	AA	ASVA	Total
ZU	9.86	2499.89	386.33	2361.74	986.81	6244.63
AF	18.14	1962.05	17271.50	23950.40	3137.18	46339.27
AA	7.88	936.05	1213.07	31781.21	1855.76	35793.97
ASVA	16.88	1199.84	2117.57	7891.88	3509.96	14736.13
Total	469.33	6635.32	21025.24	66109.84	9526.75	103766.48

CA = cuerpo de agua; ZU = zona urbana; AF = área forestal; AA = área agrícola; ASVA = área sin vegetación aparente.

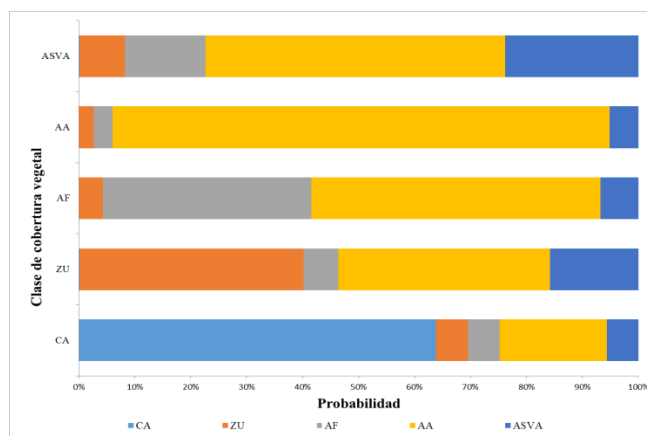


Figura 3. Probabilidad de permanencia de uso de suelo del periodo 1992-2000.

En contraste, el área forestal fue la cobertura que mayor cambio de superficie tuvo con 63%, y solo conservó el 37% de ésta. Cabe resaltar, que el 52 % $\left(\frac{23950,40}{46339,27} = 51.68 \%\right)$ de la superficie forestal pasó a área agrícola; lo que muestra que la agricultura es una actividad que reemplaza a otras categorías rápidamente (Sánchez *et al.*, 2009; Cuevas *et al.*, 2011), debido a que la población demanda bienes y servicios, juega un papel importante en el cambio de uso de suelo, ya que al incrementar la población la presión sobre los recursos naturales también aumenta generando impactos negativos como la deforestación (Rosete-Vergés *et al.*, 2014). También es importante destacar que el 4 % de la superficie forestal cambió a zona urbana $\left(\frac{1962,05}{46339,27} = 4.23 \%\right)$, esto se debe a que la población pasó de 213,208

habitantes en el 1990 a 245,112 habitantes para el 2000 de acuerdo con cifras reportadas por el (INEGI, 1990; INEGI, 2000). Respecto a la zona urbana, de su 100 % solamente permaneció el 40 % $\left(\frac{2499.89}{6244.63} = 40.03 \%\right)$, el 60 % cambio. En particular, cabe destacar que el 38 % $\left(\frac{2361.74}{6244.63} = 37.82 \%\right)$ pasó a área agrícola y el 16 % $\left(\frac{986.81}{6244.63} = 15.80 \%\right)$ a área sin vegetación o abandonada. Esto se debe a que el número de personas aumenta y se requieren más bienes para cubrir las necesidades monetarias, además en esa década de acuerdo a Cruz (2018) hubo un incremento en la migración de retorno desde Estados Unidos al estado de Hidalgo. Por otra parte, las áreas sin vegetación aumentan porque son abandonadas debido a la disminución en la producción agrícola. Durante el periodo 2000 a 2017, el 76 % $\left(\frac{367.42+2739.10+\dots+891.49}{103766.48} = 75.67 \%\right)$ de la superficie total de la cuenca permaneció sin cambio, mientras que el 24 % restante presentó algún cambio (Cuadro 7). De acuerdo con la clasificación de Sánchez *et al.* (2003), las categorías: cuerpo de agua $\left(\frac{367.42}{472.95} = 77.68 \%\right)$, área forestal $\left(\frac{16253.85}{21023.28} = 77.31 \%\right)$, y área agrícola $\left(\frac{58269.63}{66102.39} = 88.15 \%\right)$ son consideradas con probabilidad de alta permanencia; mientras que las categorías: zona urbana $\left(\frac{2739.10}{6638.49} = 41.26 \%\right)$ y áreas sin vegetación aparente $\left(\frac{891.49}{9528.66} = 9.35 \%\right)$ son consideradas con media y baja probabilidad de permanencia (Figura 4), respectivamente.

Cuadro 7. Matriz de transición 2000-2017.

Superficie (ha)	Capa de 2017					
2000	CA	ZU	AF	AA	ASVA	Total
CA	367.42	20.74	46.02	30.09	8.68	472.95
ZU	30.46	2739.10	695.91	3041.85	131.17	6638.49
AF	24.16	292.36	16253.85	3660.42	792.49	21023.28
AA	256.36	1906.24	4057.50	58269.63	1612.66	66102.39
ASVA	43.96	953.05	2208.54	5431.62	891.49	9528.66
Total	722.36	5911.49	23261.82	70433.61	3436.49	103766.48

CA = cuerpo de agua; ZU = zona urbana; AF = área forestal; AA = área agrícola; ASVA = área sin vegetación aparente.

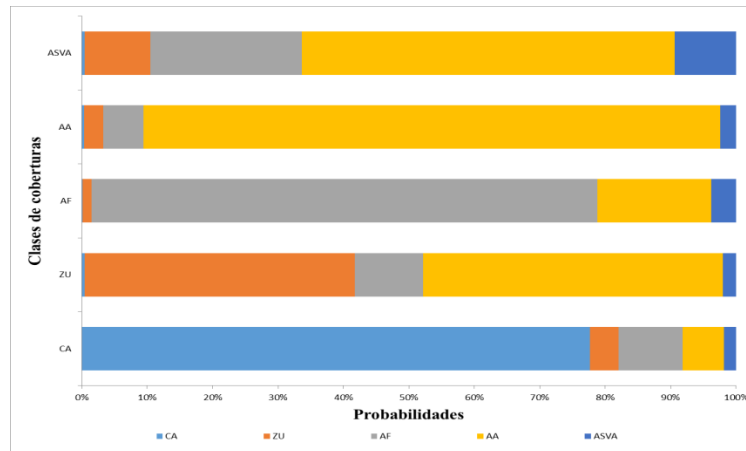


Figura 4. Probabilidad de permanencia de uso de suelo del periodo 2000-2017.

Cabe destacar que la superficie agrícola incrementó en 83 % $\left(\frac{58269.63}{31781.21} - 1 = 83.34 \%\right)$; sin embargo, el área forestal disminuyó 5.89 % $\left(\frac{16253.85}{17271.50} - 1 = 5.89 \%\right)$, aunque a una tasa menor con respecto al periodo 1992-2000. Algo semejante sucede con la categoría sin vegetación, ésta se redujo en 75 % $\left(\frac{891.49}{3509.96} - 1 = 74.60 \%\right)$, pasando principalmente a área agrícola y área forestal. Tal y como ya se mencionó, las zonas urbanas obtuvieron una probabilidad media de permanencia, atribuido primordialmente por el incremento de la población en la microcuenca, siendo éste alrededor de 149 % $\left(\frac{288196}{115,547} - 1 = 149.41 \%\right)$, tomando como año base 1970 con una población de 115,547 habitantes (INEGI, 1970) y como año final 2010 con una población de 288,196 habitantes (INEGI, 2013), la población tuvo una tasa de crecimiento de 2.3 % , pasando de 245112 habitantes en el año 2000 a 288,196 en el año 2010 (INEGI, 2000; INEGI, 2013). El aumento en la población resulta en mayor demanda de terrenos para satisfacer las necesidades productivas y de consumo de la población (Cuevas *et al.*, 2011; García *et al.*, 2012; Torres *et al.*, 2018).

5.5.2 Tasas de cambio

El Cuadro 8 indica que las tasas de cambio de uso del suelo en el periodo 1992-2000 son mayores que las registradas en el periodo 2000-2017. Para el caso del área forestal, ésta presenta una tasa negativa para el periodo de 1992-2000 y positiva para para el periodo 2000-2017, lo cual coincide con algunos estudios realizados en México, en periodos similares (Velázquez *et al.*, 2002; García-Barrios *et al.*, 2009; CONAFOR y UACH, 2013). Sin embargo, el resultado obtenido por la FAO (2010) es mayor en 4%. Las áreas sin vegetación aparente tienen una tasa de cambio positiva que se mantiene en ambos periodos, lo que indica que las zonas erosionadas y empleadas como mina siguen existiendo. El área agrícola en el primer periodo tuvo una tasa de cambio positiva que va de la mano con la tasa de cambio de las zonas urbanas, esto se debe a que la población necesita de bienes para cubrir sus necesidades. Durante el segundo periodo, la superficie de cuerpos de agua tuvo un incremento del 24%, el cual está relacionado con el incremento del área agrícola, debido a que al incrementar ésta se necesita más agua, lo que lleva a la población a construir más jagüeyes para retener o captar agua de lluvia.

Cuadro 8. Tasa de cambio de uso del suelo, 1992-2017.

Clase	Cambio (ha)		Cambio (%)		Tasa de cambio	
	1992-2000	2000-2017	1992-2000	2000-2017	1992-2000	2000-2017
CA	-179.53	249.41	-0.17	0.24	0.04	-0.03
ZU	393.86	-727.00	0.38	-0.70	-0.01	0.01
AF	-25315.99	2238.54	-24.40	2.16	0.09	-0.01
AA	30308.42	4331.22	29.21	4.17	-0.08	0.00
ASVA	-5207.47	-6092.17	-5.02	-5.87	0.05	0.06

CA = cuerpo de agua; ZU = zona urbana; AF = área forestal; AA = área agrícola; ASVA = área sin vegetación aparente.

Respecto al periodo 1992-2000, en el Cuadro 9 se muestran los procesos de cambio de la superficie total que ocurrieron en la microcuenca: 37% (38,667.76 ha) no cambió, 28% fue deforestada principalmente

para fines de uso agrícolas, lo cual coincide con expuesto por SEMARNAT (2002) en el estudio realizado en el periodo 1993-2000 a nivel nacional.

Cuadro 9. Descripción de procesos de cambio 1992-2000

Proceso de cambio		1992-2000		2000-2017	
Clave	Descripción	ha	%	ha	%
A	Uso antrópico	2138.76	2.06	3121.66	3.01
C	Conservada	17453.05	16.82	16418.45	15.82
D	Deforestada	29041.73	27.99	4606.48	4.44
O	Otros usos	2743.88	2.64	1698.18	1.64
P	Por actividad productiva	2340.33	2.26	2900.64	2.80
R	Recuperación	7767.86	7.49	5079.67	4.90
S	Sin cambio	38667.76	37.26	63158.49	60.87
T	Transición	3613.10	3.48	6782.78	6.54

En cuanto al periodo de 2000-2017, el Cuadro 6 indica que el 61 % (63,158.49 ha) de la superficie total de la microcuenca permaneció sin cambio, mientras un 16 % permaneció conservada, y los demás cambios fueron menores. Respecto a la deforestación, cabe resaltar que del año 2000 al 2010, la superficie forestal permaneció prácticamente igual tanto en Norteamérica como Centroamérica (FAO, 2010); sin embargo, esto no significa que ésta haya acabado. En particular, en México, en el periodo del 2000 al 2007, fueron implementadas políticas federales para impulsar la reforestación, principalmente con un enfoque de restauración (Rosete *et al.*, 2008).

5.6 Conclusiones

La microcuenca Tula ha presentado cambios significativos en su uso de suelo, en el periodo 1992-2000, la cobertura con mayor cambio fue el área forestal con 63%, el 52% del área forestal pasó a área agrícola, además la población incremento un 14%, lo que indica que la deforestación ocurrió principalmente por la

necesidad de producir bienes para satisfacer las necesidades de la población, y porque no había políticas públicas que regularan el aprovechamiento de los recursos forestales. Durante el periodo 2000-2017, el área forestal solo disminuyó el 6%, debido a la implementación de políticas públicas federales y a las políticas estatales del Estado de Hidalgo, las cuales contribuyeron a contrarrestar la deforestación y a recuperar áreas abandonada. La tendencia del uso de suelo en la microcuenca es que la mayor parte de la superficie continúe sin cambio, las áreas agrícolas existentes se mantengan y sigan incrementándose hasta que sean abandonadas debido a su disminución en la productividad e invadidas por las zonas urbanas, las cuales incrementarán debido al crecimiento de la población.

5.7 Literatura citada

- Bautista, Z. F.; Palacio, P. J. L.; Delfín, G. H.; Páez, B. R.; Carmona, J. E. y Delgado, C. M. del C. 2011. Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales. Universidad Autónoma de México. Segunda edición. México. 770 p.
http://www.unam.mx/publicaciones/images/abook_file/tmuestreo.pdf
- Chander, G.; Markham, B. L. and Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment. 5(113): 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Universidad Autónoma Chapingo (UACH). 2013. Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. Gómez, D. J. D.; Monterroso, R. A. I.; Lechuga, G. L. M.; Hernández, V. C. C. (eds.). Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. 160 pp.
<http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/fomento/documentos/degradacion-tierras-desertificacion2.pdf>
- Cruz, I. C. 2018. Políticas públicas y migración de retorno desde Estados Unidos: el caso de los municipios metropolitanos hidalguenses. Tlamelaua, revista de ciencias sociales. 45(12):208-238.
<http://dx.doi.org/10.32399/rtla.12.45.770>

- Cuevas, M. L.; Garrido, A.; Pérez, D. J. y Iura, G. D. 2011. Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. *In: Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización.* Cotler, A. H. (coord.). Pluralia Ediciones e Impresiones S. A. de C. V. México. 96-103pp. <https://agua.org.mx/biblioteca/las-cuencas-hidrograficas-de-mexico-diagnostico-y-priorizacion/>
- Del Ángel-Mobarak, G. A. 2012. El medio forestal de México. *In: La Comisión Nacional Forestal en la historia y el futuro de la política forestal de México.* Centro de investigación y docencia económicas-Comisión Nacional Forestal. México. 35-80 pp.
- Earth-Google. 2018. Google Earth 7.3.2. <https://www.google.com/intl/es-419/earth7>
- Eastman, J. R. 2012. TerrSet Geospatial onitoring and modeling system manual. Clark labs. Worcester, USA. 393 pp. <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1996. Forest resources assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. FAO forestry paper, 130. 152 pp.
- García-Barrios, L.; Galván-Miyoshi, Y. M.; Valsieso-Pérez, I. A.; Masera, O. R.; Bocco, G. and Vandermeer, J. 2009. Neotropical forest conservation, agricultural intensification, and rural out-migration: the mexican experience. *BioScience*. 10(59):863-873. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.10.8>
- García, O. J. A.; Cedillo, G. J. G.; Juan, P. J. I. y Balderas, P. Á. M. 2012. Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del río San José en el Estado de México. España. *Papeles de Geografía*. 55-56(1): 63-73.
- Gobierno del Estado de Hidalgo (GEH). 2006. Ley de Desarrollo Forestal Sustentable para el Estado de Hidalgo. Instituto de Estudios Legislativos. Segunda edición. México. 51 pp. http://www.pjhidalgo.gob.mx/transparencia/leyes_reglamentos/leyes/30_ley_desarrollo_forestal_hidalgo.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1970. IX Censo general de población 1970. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1970/default.html#Publicaciones>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1990. XI Censo general de población y vivienda 1990. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1990/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2000. XII Censo general de población y vivienda 2010. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. Censo de población y vivienda 2010. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017 a. Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 671 pp. https://www.datatur.Sector.gob.mx/ITxEF_Docs/HGO_ANUARIO_PDF.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017 b. Anuario estadístico y geográfico de México 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825097912>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017 c. Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/TLAX_ANUARIO_PDF.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017 d. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000. Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=0150011_000000000&ag=00
- Leija-Loredo, E. G.; Pavón, N. P.; Sánchez-González, A.; Rodríguez-Laguna, R. and Ángeles-Pérez, G. 2018. Land cover change and carbon stores in a tropical montane cloud forest in the Sierra Madre Oriental, Mexico. Journal of Mountain Science. 10(15): 2136-2147. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4937-y>

- López, G. E. M.; Bocco, G. y Mendoza, C. M. E. 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 45(1): 56-76.
- Merino-Pérez, L. y Segura-Wamholtz, G. 2002. Las políticas forestales y de conservación y sus impactos en las comunidades forestales en México. *In: Los bosques comunitarios de México: manejo sustentable de paisajes forestales*. Bray, D.; Merino, L. y Barry, Deborah (eds.). Instituto Nacional de Ecología. México. 77-98 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Estudio FAO: Montes. Roma. 346 pp. <http://www.fao.org/3/i1757s/i1757s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2016. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015, ¿Cómo están cambiando los bosques del mundo?. FAO. Segunda edición. Roma. 44 pp. <http://www.fao.org/3/a-i4793s.pdf>
- Poder Ejecutivo Federal (PEF). 1989. Plan Nacional de Desarrollo 1984-1994. Diario Oficial de la Federación. México. 78 pp. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/compila/pnd/PND_1989-1994_31may89.pdf
- Poder Ejecutivo Federal (PEF). 1995. Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000. Diario Oficial de la Federación. México. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/compila/pnd.htm>
- Reynoso, S. R.; Valdez, L. J. R.; Escalona, M. M. J. y De los Santos, P. H. M. 2015. Análisis de la dinámica del uso del suelo de la cuenca Metztitlán en Hidalgo, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 3(36):102-111.
- Rosete-Vergés, F.; Pérez-Damián, J. L.; Villalobos-Delgado, M.; Navarro-Salas, E. N.; Salinas-Chávez, E. y Remond-Noa, R. 2014. El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*. 1(20):21-35. <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n1/v20n1a3.pdf>
- Rosete, V. F. A.; Pérez, D. J. L. y Bocco, G. 2008. Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones geográficas*. 67(1):39-58.

- Sahagún-Sánchez, F. J. y Reyes-Hernández, H. 2018. Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *CienciaUAT*. 2(12):6-21. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582018000100006
- Sánchez, C. S.; Flores, M. A.; Cruz-Leyva, I. A. y Velázquez, A. 2009. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. *In: Capital Natural de México*. Sarukhán, J. (coord.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 34 pp.
- Sánchez, J.; Bocco, G.; Fuentes, J. y Velázquez, A. 2004. Análisis de cobertura y uso del terreno en el contexto de su dinámica espacio-temporal. *In: Las enseñanzas de San Juan: Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*. Velázquez, A.; Torres, A. y Bocco, G. (comps). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México. 235-256 pp.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADR). 2005. Programa estatal de silvicultura sustentable 2005-2011. Gobierno del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México. http://intranet.ehidalgo.gob.mx/NormatecaE/Archivos/Programa_SilviculturaSustentable.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Compendio de estadísticas ambientales. Dirección General de Estadística e Información Ambiental. México. 275 pp. http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/Presentacion/index.htm
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2003. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Cámara de diputados del H. Consejo de la Unión. México. 69 pp. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS_050618.pdf
- Torres, B. M.; Favela, L. S.; Alanís, F. G. y González, R. J. I. 2018. Dinámica de uso de suelo en una Región Hidrológica Prioritaria de la cuenca Río Bravo, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 46(9):54-79. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.136>

- Vargas-Sanabria, D. y Campos-Vargas, C. 2018. Sistema multi-algoritmo para la clasificación de coberturas de la tierra en el bosque seco tropical del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*. 1(31):58-69.
- Vega, C. R.; Ruiz, C. J.; Linares, F. G.; Pérez, A. R. y Tamariz, F. V. 2007. Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas*. 64(1):75-89.
- Velázquez, A.; Mas, J. F.; Díaz, Gallegos, J.; Mayorga, S. R.; Alcántara, P. C.; Castro, R.; Fernández, T.; Bocco, G.; Ezcurra, E. y Palacio, J. L. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *México. Gaceta Ecológica*. 62(1):21-37.
- Xiao, J.; Shen, Y.; Ge, J.; Tateishi, R.; Tang, C.; Liang, Y.; and Huang, Z. 2006. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*. 1-2(75):69-80. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.12.005>

6. Evaluación de la adaptación de dos especies leguminosas mediante la modelación de sus nichos ecológicos en la microcuenca Tula, México

Evaluation of the adaptation of two leguminous species by modeling their ecological niches in the Tula microwatershed, Mexico

Mayra Clementina Zamora Elizalde¹, Julio Cesar Buendía Espinoza², Arturo Morales Garcia³
Pedro Arturo Martínez Hernández⁴, Rosa María García Nuñez⁵.

¹Alumna de la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México.

²Autor para correspondencia. Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México. jcbuendiae@hotmail.com

³Alumno de la Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México.

⁴Posgrado en producción animal. Departamento de Zootecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México.

⁵Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera Texcoco-México. 56230. Texcoco, Estado de México.

6.1 Resumen

Macroptilium atropurpureum [(Moc. & Sesse ex DC.) Urban] y *Vicia sativa* L. son dos especies de la familia Fabaceae que posee una distribución cosmopolita, y tienen diversos usos. Actualmente no se ha estudiado su distribución geográfica potencial, por lo que no se conocen las regiones en las que es conveniente introducirlas; por ello el objetivo del presente trabajo es evaluar la distribución geográfica potencial de dos especies forrajeras en la microcuenca Tula, México a través de la modelación de su nicho ecológico para determinar si las especies se pueden emplear en actividades de rehabilitación de suelos en esta región.

Se emplearon 15 variables ambientales (14 climáticas y 1 topográfica), se consultaron las bases de datos del Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB) y el Herbario Nacional de México (MEXU) de donde se obtuvieron 19 registros de ocurrencia para *V. sativa* y 219 para *M. atropurpureum*. La modelación se hizo en el programa DIVA-GIS y la elaboración los mapas en ArcMap 10.5. Para *V. sativa* se obtuvo en 96% de la superficie de la microcuenca en potencial bajo y muy bajo y para *M. atropurpureum* un 97% para potencial bajo. La validación de los modelos se realizó experimentalmente en el Ejido de San Felipe Teotitlán, Estado de México en donde se obtuvo una supervivencia en 2019 de 66 y 70% de *M. atropurpureum* y *V. sativa* respectivamente sin alcanzar un óptimo desarrollo. Debido al bajo potencial de distribución su introducción para aprovechamiento en la región no se considera factible.

Palabras clave: distribución potencial; DIVA-GIS; *Macroptilium atropurpureum*; supervivencia; *Vicia sativa*.

6.2 Abstract

Macroptilium atropurpureum [(Moc. & Sesse ex DC.) Urban] and *Vicia sativa* L. are two species of the *Fabaceae* family that have a cosmopolitan distribution, and have various uses. Currently, its potential geographical distribution has not been studied, so the regions in which it is convenient to introduce them are unknown; Therefore, the objective of the present work is to evaluate the potential geographical distribution of two forage species in the Tula microwatershed, Mexico through the modeling of its ecological niche to determine if the species can be used in soil rehabilitation activities in this region.

15 environmental variables (14 climatic and 1 topographic) were used, the databases of the World Biodiversity Information Network (REMIB) and the National Herbarium of Mexico (MEXU) were consulted, from which 19 records of occurrence were obtained for *V. sativa* and 219 for *M. atropurpureum*. The modeling was done in the DIVA-GIS program and the elaboration of the maps in ArcMap 10.5. For *V. sativa*, 96% of the surface of the microbasin was obtained in low and very low potential and for *M. atropurpureum* 97% for low potential. The validation of the models was carried out experimentally in the Ejido of San Felipe Teotitlán, State of Mexico where a survival in 2019 of 66 and 70% of *M. atropurpureum* and *V. sativa* respectively was obtained, respectively, without achieving optimal development. Due to the low distribution potential, its introduction for exploitation in the region is not considered feasible.

Keywords: potential distribution; DIVA-GIS; *Macroptilium atropurpureum*; survival; *Vicia sativa*.

6.3 Introducción

México es un país privilegiado por su biodiversidad, es uno de los cinco países megadiversos en el mundo, debido a la flora y fauna que se distribuye en su territorio y el número de endemismos que se presentan (Jiménez *et al.*, 2014; Plasencia-Vázquez, Escalona-Segura y Esparza-Olguín, 2014). Se han realizado estudios buscando delimitar la distribución geográfica de algunas taxas en donde se han empleado límites estatales (Dávila-Aranda, Lira-Saade, y Valdés-Reyna 2004). Sin embargo no se conocen todas las áreas de distribución geográfica de las especies del país (Contreras-Medina, Luna-Vega y Ríos-Muñoz, 2010).

En los últimos 15 años el desarrollo de programas para la modelación de nichos ecológicos (MNE) y distribución de áreas geográficas ha sido un campo nuevo de investigación con alto crecimiento (Kearney, 2006; Lobo, Jiménez-Valverde, y Hortal, 2010). Los MNE se utilizan para identificar lugares adecuados para la supervivencia de las poblaciones de una determinada especie a partir de sus requerimientos ambientales (Soberon y Nakamura, 2009); empleando programas como Bioclim, GARP, Maxent y NicheA (Cuervo-Robayo *et al.*, 2017; Phillips, Anderson, y Schapire, 2006). Estos modelos se basan en el concepto de nicho ecológico de Hutchinson (1957), relacionando la información biológica de la especie y la información ambiental obtenida de bases de datos de los sitios en donde ha sido observada, para poder identificar las áreas en donde no existen registros previos de la especie (Soberón, 2007; Soberón y Peterson, 2005).

La modelación de nichos para identificar las áreas de distribución potenciales han sido utilizadas en diferentes especies nativas y exóticas, de flora y fauna; en el mundo y en México (Amat, 2009; Palma-Ordaz y Delgadillo-rodríguez, 2014; Hai-Sheng, Yu-Lian, y Xu-Gao, 2015). A pesar de ello son pocos los trabajos con enfoque de modelado de nicho ecológico con plantas nativas y exóticas en México (Contreras-Medina *et al.*, 2010) algunos estudios de la

distribución potencial geográfica se encuentra el de Reynoso *et al.* (2018) con *Pinus pseudostrobus* y *P. ocarpa*, Martínez-Méndez, Aguirre-Planter, Eguiarte, y Jaramillo-Correa (2016) con ocho especies y dos variedades del género *Abies* (*A. concolor*, *A. durangensis* var. *durangensis*, *A. durangensis* var. *coahuilensis*, *A. flincki*, *A. guatemalensis*, *A. hickelii*, *A. jaliscana*, *A. religiosa* y *A. vejari*), Palma-Ordaz y Delgadillo-Rodríguez (2014) con ocho especies exóticas de carácter invasor *Atriplex semibaccata*, *Brassica tournefortii*, *Bromus rubens*, *Centaurea melitensis*, *Cynodon dactylon*, *Salsola tragus*, *Schismus barbatus* y *Tamarix ramosissima*, Palacios, Rodríguez y Hernández (2016) con *Prosopis laevigata* Solano y Feria (2007) con el género *Polianthes* L. (*Agavaceae*). En todos los estudios se emplearon algoritmos para modelar los nichos ecológicos y determinar la distribución potencial de las especies.

En el presente trabajo se evaluó la distribución potencial de *M. atropurpureum* y *V. sativa* en la microcuenca Tula. Ambas especies pertenecen a la familia *Fabaceae*. De acuerdo a Lewis, Schrire, MacKinder, y Lock (2005) en el mundo se reconocen hasta 727 géneros con 19,327 especies de distribución cosmopolita, ubicadas principalmente en regiones cálidas y templadas; en México se han reconocido 1,851 especies (Sousa S, Ricker, y Hernández, 2001). *M. atropurpureum*, conocida como siratro, es una forrajera, que de acuerdo a Peters, Franco, Schmidt, & Hincapié (2010) es perenne de vida corta, rastrera y estolonífera, que se desarrolla preferentemente en suelos de textura delgada, aunque puede desarrollarse en un amplio rango de suelos, con pH que van desde 4.5 hasta 8.9. Su temperatura óptima de crecimiento está entre 26.5 y 30 °C (Vibrans, 2009a). Las evaluaciones físico químicas en esta especie establecen que su altura puede variar de 0.073 a 0.227 metros, con una cobertura de 26.7 a 91% dependiendo de las condiciones climáticas (Alatorre-Hernández *et al.*, 2018; Njarui y Wandera, 2004). *V. sativa* es una leguminosa anual conocida como veza común o ebo,

originaria del sudeste de Europa, oeste de Asia y norte de África (Vibrans, 2009b). De acuerdo a la literatura sus características morfológicas son hojas imparipinadas aunque con el foliolo terminal esta transformado en zarcillo; es una especie tolerante a la sequía aunque es relativamente exigente en precipitaciones durante su periodo vegetativo, a pesar de eso no soporta encharcamiento. Comúnmente es utilizada como forraje, abono verde y suele ser cultivada asociándola a maíz y frijol para recuperar la fertilidad del suelo (Treviño, Caballero, y Gil, 2011; Vibrans, 2009b). Actualmente no se han realizado estudios de la distribución potencial de estas dos especies en México, que por sus características son de fácil adaptación.

6.4 Objetivos

Este trabajo planteó como objetivo principal evaluar la distribución geográfica potencial de dos especies forrajeras en la microcuenca Tula, México a través de la modelación de sus respectivos nichos ecológicos para determinar si las especies se pueden emplear en el diseño de proyectos mejoradores en esta región.

6.5 Materiales y métodos

6.5.1 Localización del área de estudio

La microcuenca Tula está ubicada al centro de México (FIGURA 5), cuenta con una superficie de 1038.24 km², conformada en un 77% por territorio del Estado de Hidalgo, 18.03% del Estado de México y un 4.8% del Estado de Tlaxcala. Las coordenadas geográficas que la enmarcan son 19°55'31.05'' y 19°34'28.74'' latitud norte y 98°39'59'' y 98°28'16.39'' latitud oeste.

Se encuentra inmersa en la cuenca del río Panuco, dentro de la provincia fisiográfica del eje neovolcánico. Presenta un rango altitudinal de los 2333 a los 3223 msnm, los tipos de suelo predominantes son feozem, cambisol, litosol, regosol y vertisol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017a, 2017b, 2017c). Al poseer una amplia variedad

climática y suelos, permite la existencia de distintos tipos de vegetación entre los que destacan bosque de táscate, bosque de pino, bosque de encino y matorral crasicaule. Otras coberturas incluyen vegetación secundaria, agricultura de temporal y agricultura de riego (INEGI, 2017a, 2017b, 2017c).



FIGURA 5. Localización del área de estudio

6.5.2 Obtención de datos de ocurrencia

Las áreas de distribución potencial de una especie se determinan mediante la modelación de nichos ecológicos, empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos de ocurrencia de la (s) especies que se desea modelar (Broennimann *et al.*, 2012; Guisan y Zimmermann, 2000). Para este estudio los registros de ocurrencia de las especies *M. atropurpureum* y *V. sativa* se obtuvieron mediante la consulta a las bases de datos del Red

Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB) y el Herbario Nacional de México (MEXU). Estas bases de datos han sido utilizadas en gran cantidad de estudios de modelación de áreas de distribución potencial de especies y modelación de nichos ecológicos (Herrera y Cortés, 2009; Martínez-Méndez *et al.*, 2016; Palacios *et al.*, 2016; Reynoso *et al.*, 2018). Las bases de datos descargadas fueron depuradas para eliminar aquellos registros repetidos, los que no contuvieran el sistema de coordenadas o se ubicaran fuera del territorio mexicano (Reynoso *et al.*, 2018).

6.5.3 Variables ambientales

Para realizar los modelos de distribución de *M. atropurpureum* y *V. sativa* se utilizaron 15 variables (TABLA 1), 14 derivadas de los valores mensuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación obtenidas de la plataforma WorlClim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005) y una de tipo topográfico. El mapa de altitud se elaboró a partir del Modelo Digital de Elevación de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2013) con una resolución espacial de 120 m.

TABLA 1. Variables incorporadas en la modelación de los nichos ecológicos de *V. sativa* y - *M. atropurpureum*.

Clave	Variable ambiental
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Intervalo de temperatura diurna media (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))
BIO3	Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (* 100)
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)

BIO5	Temperatura máxima del mes más calentamiento
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Intervalo anual de temperatura (BIO5-BIO6)
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO12	Precipitación total anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de precipitación (Coeficiente de variación)
BIO16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación del trimestre más seco
Alt	Altitud (msnm)

6.5.4 Modelación con DIVA-GIS

El análisis de distribución geográfica potencial de ambas especies se realizó con el programa DIVA-GIS ver. 7.5.0, y se empleó el algoritmo de BIOCLIM el cual es de funciones envolventes, es decir crea una envoltura rectilínea en el espacio ambiental, definido por los registros más extremos (mínimo y máximo) de la especie por cada variables ambiental (Hijmans *et al.*, 2004). Para emplear este programa fue necesario homogenizar las capas a un tamaño estándar de pixel 2.5' y se recortaron con el límite preestablecido de la República Mexicana, utilizando el programa ArcMap 10.5. (Martínez-Méndez *et al.*, 2016; Reynoso *et al.*, 2018).

6.5.5 Validación

Se realizó a través de un experimento en una parcela ubicada dentro de la microcuenca Tula, en el Ejido de San Felipe Teotitlán, que abarca parte de los municipios de Axapusco y Nopaltepec en el Estado de México. Esta parcela es parte del área común de este ejido, con coordenadas geográficas 19°50'24.0'' y 19°49'00'' de latitud norte y 98°42'00'' de longitud oeste (FIGURA 6). El sitio fue elegido por el interés expuesto de parte de los ejidatarios de usar especies de doble propósito (para rehabilitar y producir forraje) ante un equipo interdisciplinario de la Universidad Autónoma Chapingo, la parcela experimental se seleccionó conjuntamente con el comisariado, considerando sus necesidades y los caminos de acceso.

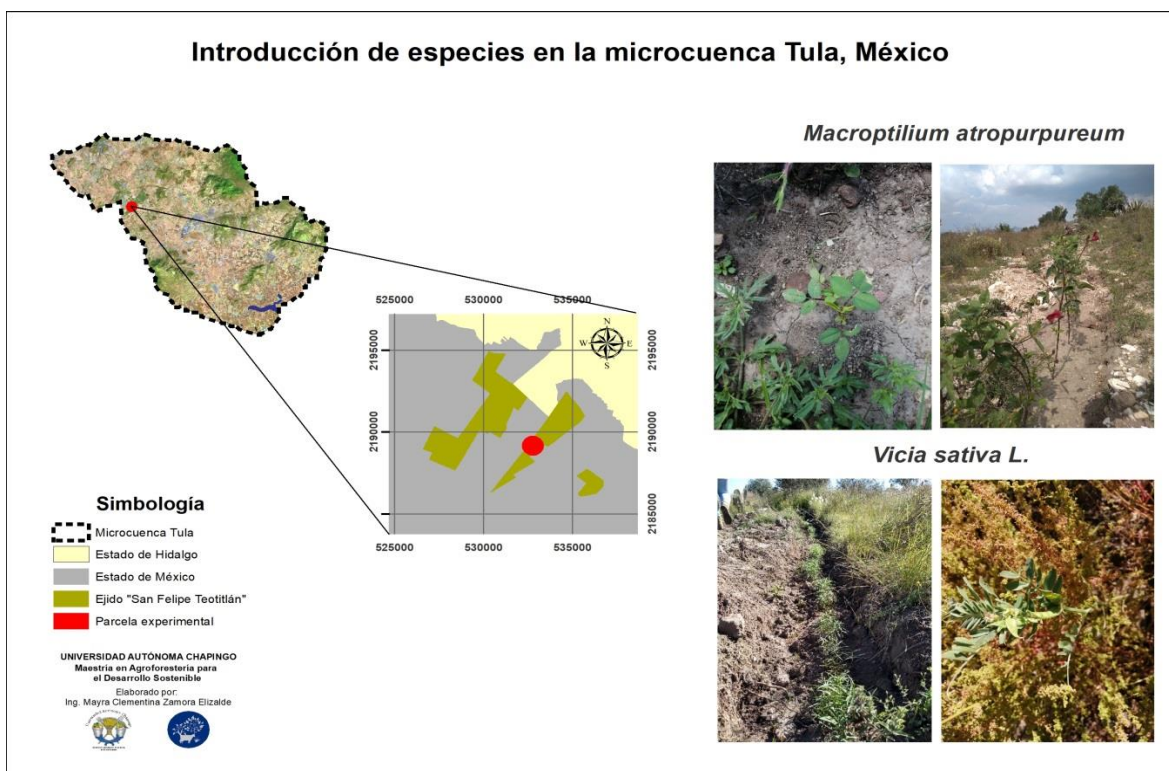


FIGURA 6. Introducción de especies en Ejido San Felipe Teotitlán, México

La introducción de las especies *V. sativa* y *M. atropurpurem* se llevó a cabo durante los años 2018 y 2019. La parcela establecida fue de 20 x 55 metros de ancho y largo respectivamente. La preparación del terreno consistió en roturar el suelo a curvas de nivel cada 11 metros, en donde posteriormente se realizaron zanjas de 20 x 0.30 x 0.20 metros de largo, ancho y profundidad respectivamente. Se rellenaron las zanjas con suelo de la región y se agregó zeolita (0.5 kg/ planta), debido a que en el sitio había gran cantidad de piedra y presencia de tepetate en los primeros 0.15 metros de profundidad.

En el periodo de mayo-julio del 2018, se llevó a cabo la producción de plántula de *M. atropurpurem* en el invernadero del Departamento de Zootecnia en la Universidad Autónoma Chapingo. Las plántulas fueron trasladadas y plantadas en las zanjas en la primera semana del mes de agosto a una distancia de 0.20 metros entre cada planta. *V. sativa* fue sembrada directamente en campo en el mismo periodo y a la misma distancia. En el mes de diciembre de 2018 se evaluó la supervivencia definida como el número de plántulas que sobreviven al final del control de seguimiento, respecto al número de plantas emergidas, este valor es expresado en porcentaje (Ramos-Font, González y Robles, 2015); para ello se contabilizó el número de plantas vivas por especie. En el mes de junio del 2019 se repusieron todas las plantas muertas, esta vez la siembra fue directa en ambas especies y se evaluó la supervivencia el mes de octubre del 2019.

6.6 Resultados y discusiones

En las bases de datos consultadas *M. atropurpureum* se obtuvieron 856 registros de ocurrencia, de los cuales solo 298 tenían sistema de coordenadas y 219 se encontraron en México. Para *V. sativa* se contabilizaron 124 registros, de esos solo 31 tenía sistema de coordenadas y solo 19 se ubicaron dentro del territorio mexicano (FIGURA 7).

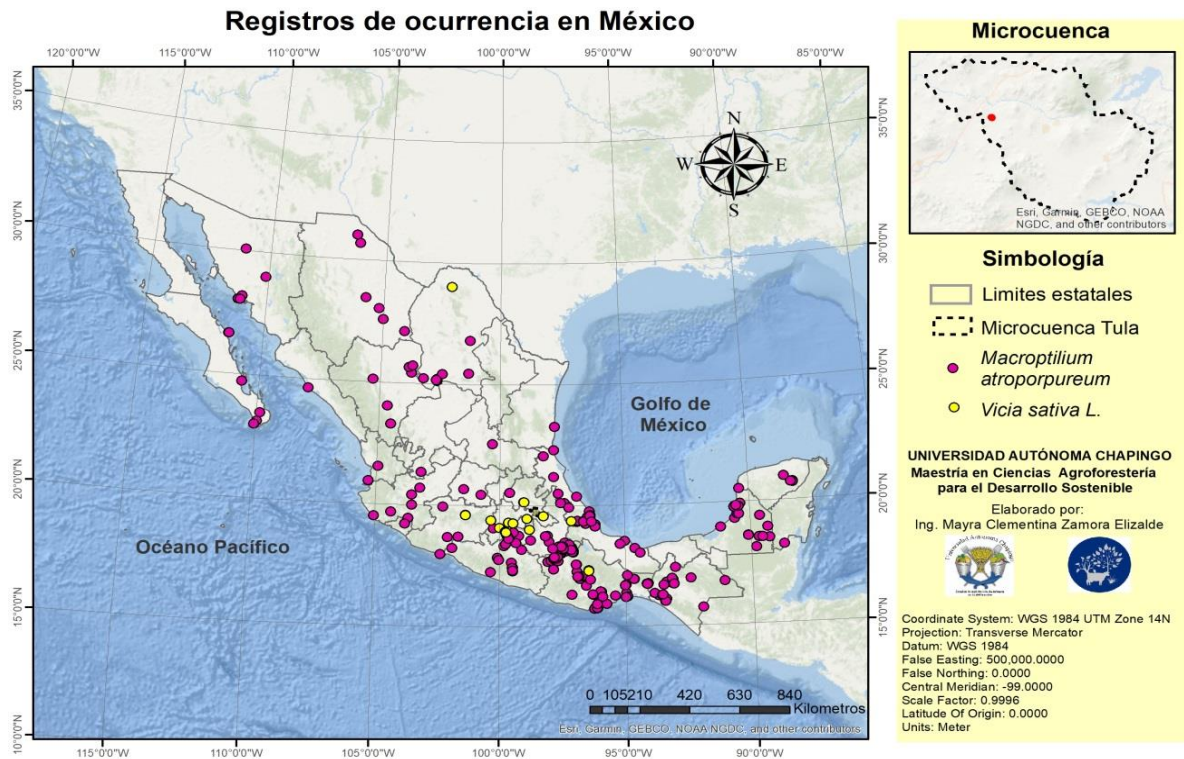


FIGURA 7. Registro de ocurrencia de *V. sativa* y *M.atropurpureum*

M. atropurpureum posee una extensa distribución en México, se le han identificado en varios estados, entre los que destacan Oaxaca (68 registros), Puebla (29), Campeche (25) y Chiapas (20) , que reúnen la mayoría de los registros de ocurrencia de la especie que coincide con lo que reporto con Vibrans (2009a). Mientras que *V. sativa* se ha registrado en siete estados, siendo el Estado de México (9 registros) el que tiene más registros, los estados coinciden con los mencionados por Vibrans (2009b) (FIGURA 8).

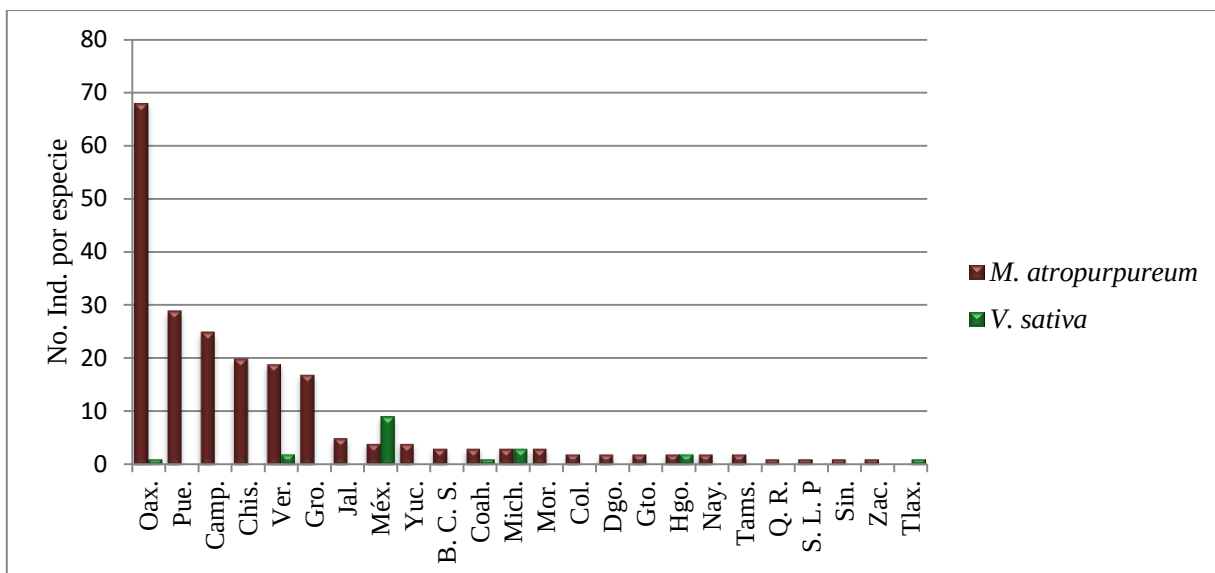


FIGURA 8. Estados con registros georeferenciados de *V. sativa* y *M. atropurpureum* en México

De acuerdo a los valores obtenidos de los registros de ocurrencia en *V. sativa* el intervalo de temperatura media anual es reducido 13.8-17.3°C (TABLA 2) e indica que no tolera el frío que coincide con Alfonso (2007). El rango de precipitación de los sitios en los cuales obtuvo mayor frecuencia de ocurrencia fue de 821-1111 milímetros mm el cual difiere con el reportado por Flores, Gutiérrez, y Palomo (2007) que fue de 200-400 milímetros, indicativo que esta especie soporta estrés hídrico. Los valores obtenidos en temperatura media anual de 12.3-27.6°C para *M. atropurpureum* indica que el intervalo de registros es mayor que en *V. sativa* y el rango de precipitación anual de 70-3386 milímetros explica su amplia distribución en México y su tolerancia, aunque se observa más en regiones con precipitaciones de 733.2-1396.4 milímetros la cual está dentro del intervalo 650-1500 milímetros reportado por Vibrans (2009a).

TABLA 2. Intervalos bioclimáticos de las zonas en las que se tiene registrada la presencia de *V. sativa* y *M. atropurpureum* en México.

Variable ambiental	<i>V. sativa</i>		<i>M. atropurpureum</i>	
	Intervalo	Int. mayor frecuencia	Intervalo	Int. mayor frecuencia
Temperatura media anual (°C)	6.9-24.1	13.8-17.3	12.3-27.6	24.5-27.6
Intervalo de t. diurna media (°C)	9.9-18.1	14.8-16.4	3.2-19.8	9.8-13.1
Isotermalidad	57.7-74.5	67.8-71.2	23.9-83.7	59.8-71.7
Estacionalidad de la t.	124.6-351.5	170-215.4	59.7-788	205.4-351
T. máx. mes más cálido (°C)	15.8-35.9	23.8-27.9	21.7-40	32.7-36.3
T. mín. mes más frío (°C)	-1.5-12	1.2-3.9	-2.9-20.1	15.5-20.1
Intervalo anual de t. (°C)	16.8-26	22.3-24.2	13.2-38.6	18.3-23.4
T. media trimestre más cálido (°C)	8.4-27.6	16.1-20	14-31.1	27.6-31.1
T. media trimestre más frío (°C)	5.4-21.3	8.6-11.8	6.8-26.5	18.6-22.6
P. total anual (mm)	531-1981	821-1111 216.8-	70-3386	733.2-1396.4
P. del mes más húmedo (mm)	92-404	279.2	16-638	140.4-264.8
P. del mes más seco (mm)	2-45	2-10	0-99	0-19.8
Estacionalidad de p. (mm)	70.8-113.1	96.2-104.7	52.3-136.2	102.6-119.4
P. del trimestre más húmedo (mm)	266-1068	586.8- 747.2	35-1693	366.6-698.2
P. trimestre más seco (mm)	17-142	17-42	0-327	0-65.4

La distribución geográfica potencial obtenida en la modelación con BIOCLIM para *V.sativa* en la microcuenca Tula fue de 4% (41.1871 km²) con un nulo potencial y 96% (997.0267 km²) de la superficie total de la microcuenca con potencial, de esta superficie el 21 (207.0848 km²) corresponde a bajo potencial y el 79% (789.9419 km²) a un potencial muy bajo (FIGURA 9). Lo que es indicio de que en la microcuenca si se desarrollará la especie pero no alcanzaran su óptimo desarrollo y por ende rendimiento.

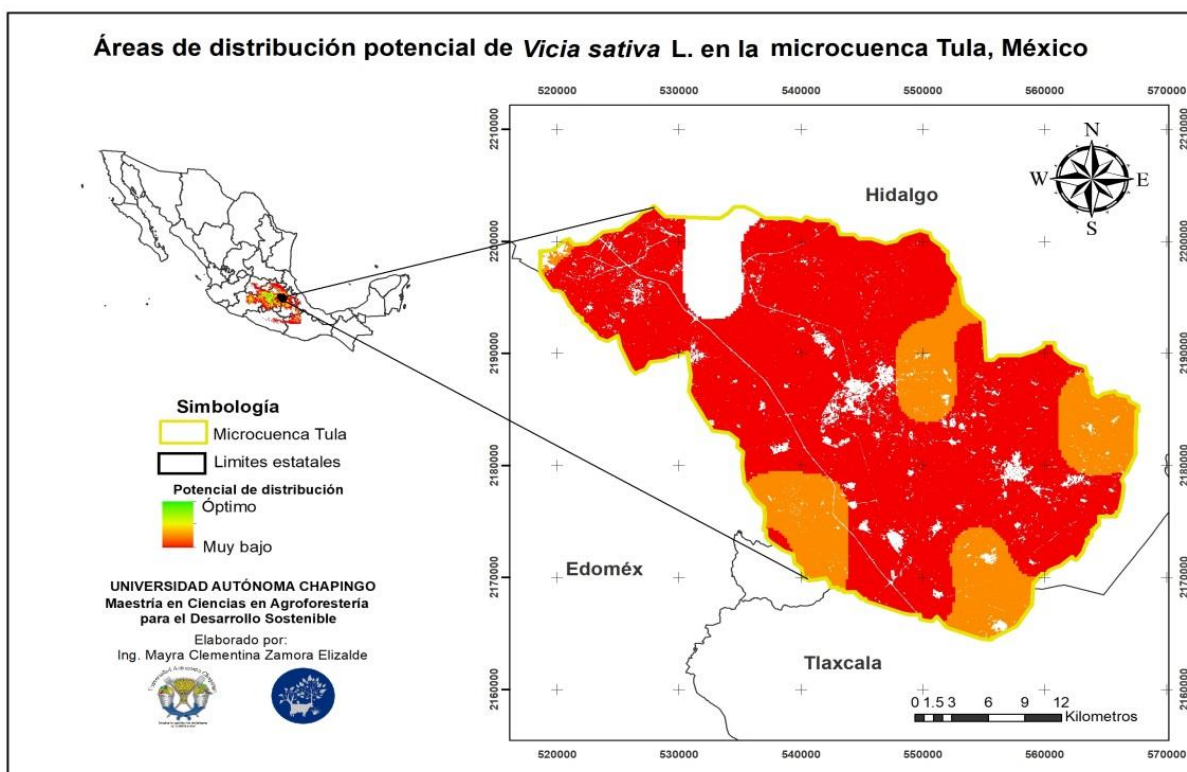


FIGURA 9. Distribución potencial de *V. sativa* en la microcuenca Tula, México

De los resultados derivados de BIOCLIM, distribución geográfica potencial de *M. atropurpureum* en la microcuenca fue de 3% (35.2066 km²) con nulo potencial y de 97% (1003.0408 km²) con muy bajo potencial (FIGURA 10).

De las plantas introducidas en el Ejido de San Felipe Teotitlán para la validación, al ser evaluadas en el año 2018, obtuvieron una supervivencia de 100% para *M. atropurpureum* y de 0% para *Vicia sativa*, la nula supervivencia en *V. sativa* se adjudicó a la presencia de fauna silvestre.

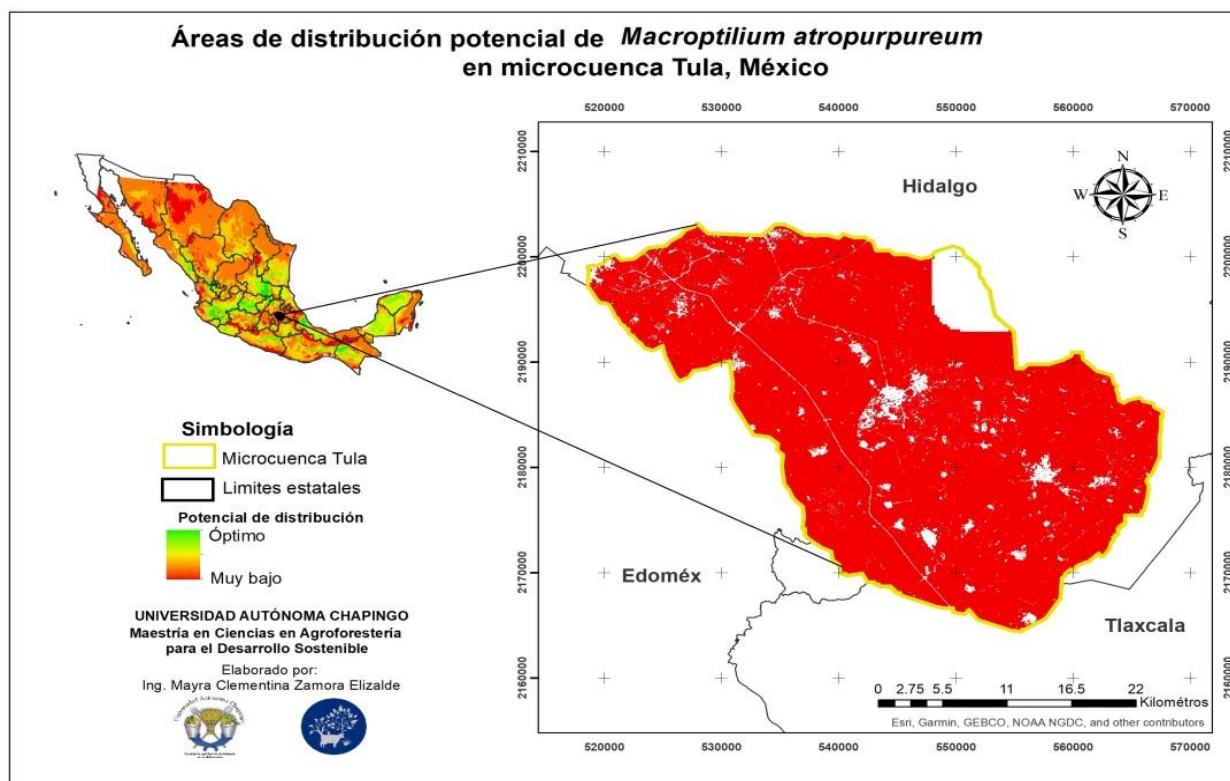


FIGURA 10. Distribución potencial de *M. atropurpureum* en la microcuenca Tula, México

Sin embargo en la evaluación del año 2019 se obtuvo una supervivencia del 66% para *M. atropurpureum*, y de 70% para *V. sativa* esta última especie compitió favorablemente contra las herbáceas anuales del sitio y alcanzó la formación de vainas, sin embargo la otra especie tuvo un crecimiento lento con una altura menor a 0.01 metros en estado vegetativo.

Cabe mencionar que es posible mejorar su adaptación al mejorar los aspectos edáficos como lo hicieron en Zacatecas con *V. sativa* (Flores *et al.*, 2007), al aplicar riegos auxiliares, fertilizar y

controlar malezas. Sin embargo por los costos que implican no se recomienda sean utilizadas en proyectos para esta región.

6.7 Conclusiones

Las especies leguminosas *M. atropurpurem* y *V. sativa* en la microcuenca Tula tienen en su mayoría, un muy bajo potencial de distribución con 97 y 96% en este nivel respectivamente, y la validación demostró el escaso desarrollo de las especies. Indicando que estas especies no son las más aptas para introducir en la microcuenca ya que no presentan una óptima distribución de acuerdo a la modelación realizada en base a las variables ambientales.

6.8 Referencias

Alatorre-Hernández, A., Guerrero-Rodríguez, J., Olvera-Hernández, J. I., Aceves-Ruíz, E., Vaquera-Huerta, H., & Vargas-López, S. (2018). Productividad, características fisicoquímicas y digestibilidad *in vitro* de leguminosas forrajeras en trópico seco de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(2), 296–315. doi:10.22319/rmcp.v9i2.4361

Alfonso S, M. A.(2007). *Leguminosas de interés para la implantación de praderas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Amat, E. (2009). Contribución al conocimiento de las Chrysomyinae y Toxotarsinae (Diptera: Calliphoridae) de Colombia. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80(003), 693–708. doi:10.22201/ib.20078706e.2009.003.166

Broennimann, O., Fitzpatrick, M. C., Pearman, P. B., Petitpierre, B., Pellissier, L., Yoccoz, N. G., ..., Guisan, A. (2012). Measuring ecological niche overlap from occurrence and spatial

environmental data. *Global Ecology and Biogeography*, 21(4), 481–497. doi: 10.1111/j.1466-8238.2011.00698.x

Contreras-Medina, R., Luna-Vega, I., & Ríos-Muñoz, C. (2010). Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural*, 83(3), 421–433. doi: 10.4067/S0716-078X2010000300009

Cuervo-Robayo, A. P., Escobar, L. E., Osorio-Olvera, L. A., Nori, J., Varela, S., Martínez-Meyer, E., ... Peterson, A. T. (2017). Introducción a los análisis espaciales con énfasis en modelos de nicho ecológico. *Biodiversity Informatics*, 12(1), 45–57. doi:10.17161/bi.v12i0.6507

Dávila-Aranda, P., Lira-Saade, R., & Valdés-Reyna, J. (2004). Endemic species of grasses in Mexico: a phytogeographic approach. *Biodiversity and Conservation*, 13(1), 1101–1121.

Flores O, M. Á., Gutiérrez L, R., & Palomo R, M. (2007). *Veza común y Lathyrus sativus L.: alternativas para producir forraje en Zacatecas*. México. D.F: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2–3), 147–186. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9

Hai-Sheng, Y., Yu-Lian, W., & Xu-Gao, W. (2015). Maxent modeling for predicting the potential distribution of Sanghuang, an important group of medicinal fungi in China. *Fungal Ecology*, 17(1), 140–145. doi: 10.1016/j.funeco.2015.06.001

Herrera A, Y., & Cortés O, A. (2009). Diversidad y distribución de las gramíneas (Poaceae) en el estado de Zacatecas. *The Botanical Research Institute of Texas, Inc.*, 3(2), 775–792.

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. doi: 10.1002/joc.1276

Hijmans, R. J., Guarino, L., Bussink, C., Mathur, P., Cruz, M., Barrantes, I., & Rojas, E. (2004). *Sistema de información geográfica para el análisis de datos de distribución de especies. DIVA-GIS*. Recuperado de http://www.diva-gis.org/docs/DIVA-GIS4_manual_Esp.pdf

Hutchinson, G. E. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, 22, 415–457.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017a). *Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo 2017*. Recuperado de https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/HGO_ANUARIO_PDF.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017b). *Anuario estadístico y geográfico de México 2017*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825097912>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017c). *Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2017*. Recuperado de https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/TLAX_ANUARIO_PDF.pdf

Jiménez S, C. L., Sosa R, J., Cortés-Calva, P., Solís C, B. A., Íñiguez D, L. I., & Ortega-Rubio, A. (2014). México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 22(60), 16–22.

Kearney, M. (2006). Habitat, environment and niche: what are we modelling? *Oikos*, 115(1), 186–191. doi: 10.1111/j.2006.0030-1299.14908.x

Lewis, G., Schrire, B., MacKinder, B., & Lock, M. (2005). *Legumes of the World*. Royal Botanic Gardens. Recuperado de <https://www.cambridge.org/core/journals/edinburgh-journal-of-botany/article/legumes-of-the-world-edited-by-g-lewis-b-schrire-b-mackinder-m-lock-royal-botanic-gardens-kew-2005-xiv-577pp-colour-photographs-line-drawings-isbn-1-900-34780-6-5500-hardback/B150C09BB9224913D2CE31834394FA7A>

Lobo, J. M., Jiménez-Valverde, A., & Hortal, J. (2010). The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modelling. *Ecography*, 33(1), 103–114. doi: 10.1111/j.11/j.1600-0587.2009.06039.x

Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 5–24. doi: 10.17129/botsci.508

Njarui, D. M. G., & Wandera, F. P. (2004). Effect of cutting frequency on productivity of five selected herbaceous legumes and five grasses in semi-arid tropical Kenya. *Tropical Grasslands*, 38(1), 158–166.

Palacios R, A., Rodríguez L, R., & Hernández F, M. de la L. (2016). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34), 35–46. doi: 10.29298/rmcf.v7i34.81

Palma-Ordaz, S., & Delgadillo-Rodríguez, J. (2014). Distribución potencial de ocho especies exóticas de carácter invasor en el estado de Baja California, México. *Botanical Sciences*, 92(4), 587-597. doi: 10.17129/botsci.135

Peters, M., Franco, L. H., Schmidt, A., & Hincapié, B. (2010). *Especies forrajeras Multipropósito: opciones para productores del trópico americano*. Costa Rica: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Plasencia-Vázquez, A. H., Escalona-Segura, G., & Esparza-Olguín, L. G. (2014). Modelación de la distribución geográfica potencial de dos especies de psitácidos neotropicales utilizando variables climáticas y topográficas. *Acta Zoológica Mexicana*, 30(3), 471–490. doi: 10.21829/azm.2014.30372

Ramos-Font, M. G., González R, J. L., & Robles C, A. B. (2015). Dispersión endozoócora de leguminosas silvestres: desde la recuperación hasta el establecimiento en campo. *Ecosistemas*, 24(3), 14-21. doi.: 10.7818/ECOS.2015.24-3.03

Reynoso S, R., Pérez H, M. J., López B, W., Hernández R, J., Muñoz F, H. J., Cob U, J. V., & Reynoso S, M. D. (2018). El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 47–68. doi: 10.29298/rmcf.v8i48.114

Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(12), 1115–1123. doi: 10.1111 / j.1461-0248.2007.01107.x

Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas : concepts , methods , and assumptions. *PNAS*, 106(2), 1–7. doi: 10.1073/pnas.0901637106

Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of model of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2 (1), 1–10. doi: 10.17161/bi.v2i0.4

Solano, E., & Feria, T. P. (2007). Ecological niche modeling and geographic distribution of the genus *Polianthes* L. (Agavaceae) in Mexico: using niche modeling to improve assessments of risk status. *Biodiversity and Conservation*, 16(6), 1885–1900. doi: 10.1007/s10531-006-9091-0

Sousa S, M., Ricker, M., & Hernández, H. M. (2001). Tree species of the family Leguminosae in Mexico. *Harvard Papers in Botany*, 6(1), 339–365.

Treviño, J., Caballero, R., & Gil, J. (2011). Estudio comparado de la composición química, digestibilidad y valor energético de diferentes cultivares y poblaciones de veza. *Pastos*, 9(2), 140–149. doi: 10.1057/fr.2011.36

Vibrans, H. (2009a). *Macroptilium atropurpureum* (Moc. & Sesse ex DC.) Urban. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/fabaceae/macroptilium-atropurpureum/fichas/ficha.htm>

Vibrans, H. (2009b). *Vicia sativa* L. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/fabaceae/vicia-sativa/fichas/ficha.htm>

7. ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 11. Reunión con ejidatarios de San Felipe Teotitlán, México



Figura 12. Recorrido en la microcuenca Tula para verificación de uso de suelo



Figura 13. Delimitación de parcela para implementación de experimento, en el Ejido de San Felipe Teotitlán, México



Figura 14. Preparación del terreno de la parcela experimental



Figura 15. Producción de plántula de *V. sativa* y *M. atropurpureum* en el invernadero de Zootecnia de la UACH.



Figura 16. Acarreo de plántula a San Felipe Teotitlán y plantación en parcela experimental.



Figura 17. Desarrollo de *V. sativa* y *M. atropurpureum* en campo durante los años 2018 y 2019.