



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Maestría en Manejo Sostenible de  
Agroecosistemas

**Agricultura de precisión a través de Modelado de Nicho  
Ecológico de cultivos con potencial de mercado en el  
estado Puebla**

Enero, 2020

Tesis presentada para obtener el grado de:  
Maestría en Manejo Sostenible de Agroecosistemas

Presenta:

García Pérez Sara

Director de tesis:

Dr. Daniel Jiménez García

Asesores de tesis:

Dr. Héctor Bernal Mendoza. Dr. Oscar A. Villarreal Espino.  
Barros Dra. Roberta Marques.



**BUAP**

La presente tesis, titulada: "Agricultura de precisión a través de Modelado de Nicho Ecológico de cultivos con potencial de mercado en el estado Puebla.", realizada por la alumna Biól. Sara García Pérez, bajo la dirección del Comité Tutorial indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN  
MANEJO SOSTENIBLE DE AGROECOSISTEMAS

COMITÉ TUTORAL:

DIRECTOR: \_\_\_\_\_

Dr. Daniel Jiménez García

ASESOR: \_\_\_\_\_

Dr. Héctor Bernal Mendoza

ASESOR: \_\_\_\_\_

Dr. Oscar Agustín Villarreal Espino Barros

REVISOR EXTERNO: \_\_\_\_\_

Mtra. Roberta Marques

# Índice

<b>Agricultura de precisión a través de Modelado de Nicho Ecológico de cultivos con potencial de mercado en el estado Puebla</b> .....	1
INTRODUCCIÓN .....	5
Agricultura de Precisión.....	5
Importancia económica de la agricultura en Puebla.....	7
<i>Agave potatorum</i> .....	10
<i>Amaranthus hypochondriacus</i> .....	13
<i>Tagetes erecta</i> .....	15
Justificación.....	18
Objetivos .....	19
Objetivo General .....	19
Objetivos específicos .....	19
Zona de estudio .....	20
Marco teórico .....	22
Agricultura de Precisión.....	22
Imágenes MODIS.....	25
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....	27
Modelado de Nicho Ecológico .....	29
Kuenm.....	32
Evaluación Multicriterio .....	33
Datos de ocurrencia.....	35
Datos ambientales .....	36
Elección de zonas de calibración y creación de los modelos .....	37
Evaluación de modelos.....	38
Evaluación Multicriterio (EMC) .....	38
❖ Definición del objetivo.....	39
❖ Definición de criterios.....	39
❖ Reescalamiento de factores .....	40
❖ Agregación de factores.....	40
❖ Ponderación de pesos .....	40
Discusión.....	50

Conclusiones .....	54
Referencias bibliográficas .....	56

# Agricultura de precisión a través de Modelado de Nicho Ecológico de cultivos con potencial de mercado en el estado Puebla

## INTRODUCCIÓN

### Agricultura de Precisión

La implementación de las nuevas tecnologías en el área agrícola debe ir dirigida a la explotación inteligente de los recursos, optimizando las características que presentan de manera natural; en ocasiones las comunidades no están conscientes de que no están utilizando de manera conveniente la riqueza natural que tienen disponible (Bongiovanni *et al.*, 2006). La Agricultura de Precisión (AP) permite una reducción de costos por unidad de producción ya que permite maximizar rendimientos, es importante recalcar que este tipo de agricultura permite la integración de los productores con el concepto de sustentabilidad del medio ambiente (Marote, 2010), el cual ha sido desplazado por los intereses económicos y productivos del sistema imperante. El uso de AP en grandes extensiones de tierra refleja ahorros importantes en la economía reduciendo los efectos medio ambientales teniendo un efecto positivo en la sociedad (Herrero, *et al.*, 2006).

El modelo político hace imposible que la agricultura explote todo el potencial con el que cuenta provocando un estancamiento (Marote, 2010). Por lo que es necesaria la aplicación de nuevas técnicas que faciliten la gestión de los procesos agrícolas mediante el uso de tecnologías, que se muestran en el cuadro 1, que en conjunto reciben el nombre de Agricultura de Precisión (AP) (Bramley, 2009), las cuales buscan la diferenciación de sectores del área agrícola con el fin de que expresen su potencial y disminuir el impacto ambiental (Ortega, *et al.*, 1999) permitiendo una administración más apropiada considerando el aspecto económico, productivo y ambiental (Reynolds *et al.*, 2014).

La expansión de los mercados del ámbito alimentario ha profundizado la industrialización de la agricultura para superar, por medio de las técnicas aplicadas en agricultura de precisión, la creciente crisis medioambiental y la necesidad de producción de alimento; poniendo así al sector agrario en la mira de la sociedad como agente que dé la solución a dichas problemáticas (Marote, 2010). Este tipo de técnicas nos ofrecen distintas herramientas que facilitan el correcto manejo de los recursos naturales en grandes áreas de tierra contribuyendo así a la sustentabilidad agrícola.

Sabiendo que la agricultura es una actividad que requiere grandes cantidades de agua es indispensable implementar estrategias que mejoren la productividad de éste. Principalmente en zonas con escasas de este recurso en donde se deben realizar distintos estudios para conocer las necesidades hídricas de cada cultivo de la zona así como la evaluación del comportamiento del agua en el sustrato mediante RIS o WSN (redes Inalámbricas de Sensores) facilitando la obtención de datos de manera precisa (Flores, *et al.*, 2015).

**Cuadro 1. Tecnologías utilizadas en la metodología de Agricultura de Precisión**

<b>Etapa</b>	<b>Tecnología Involucrada</b>	<b>Actividad que facilita</b>
<b>Captura de Información</b>	GPS SIG Instrumentos topográficos Sensores remotos Sensores directos	Muestreo de suelos Recorrido de cultivos Monitoreo de rendimientos Medición directa de características específicas Sensoramiento remoto de las áreas de cultivo
<b>Análisis</b>	Programas especializados (p. e. SIG) Programas estadísticos	Análisis de dependencia espacial Fabricación de mapas para evaluar las prescripciones
<b>Medidas prescriptivas</b>	Tecnología de dosis variables	Aplicación de insumos Siembra diferencial

	Pulverización asistida por GPS Programas especializados	Registro y evaluación del sistema
--	------------------------------------------------------------	-----------------------------------

Adaptado del presentado por Reynolds Chávez, 2014.

Algunos puntos de la agenda agrícola que se pueden mejorar utilizando las herramientas de AP son:

- I. Reducción de costos: Al haber una reducción de insumos y un mejor aprovechamiento de residuos.
- II. Mejor administración productiva: Mejorando la eficiencia de insumos y conociendo mejor cada punto del área productiva, en cuanto a fertilidad y adaptabilidad (Marote, 2010).
- III. Entre los beneficios que podemos obtener del uso de las herramientas de las que se alimenta la AP es que ha habido una reducción de agroquímicos ya que mediante una variación espacial de aplicación de fertilizantes considerando de antemano la fertilidad del suelo y la demanda del cultivo entre otros factores que pueden conocerse con exactitud a partir de la implementación tecnológica al área agrícola (Pérez *et al.*, 2009).

De esta manera, cuando el uso de estos instrumentos se generalice a la siembra de cultivos en grandes extensiones de tierra se lograrán ahorros económicos importantes, reduciendo los efectos negativos en el medio ambiente al controlar el uso de agroquímicos, provocando así un freno en la utilización de estos productos reduciéndolos únicamente a las zonas en las que realmente son necesarios (Herrero *et al.*, 2006).

## Importancia económica de la agricultura en Puebla

La inserción en el área laboral de las personas campesinas ha generado una reestructuración agraria ya que ha habido una integración de actividades agrícolas y no agrícolas, la permanencia de estas personas en sus comunidades es mayoritariamente gracias a la vinculación de estas actividades, generando una perspectiva híbrida entre lo rural y lo urbano.

Al tener un sistema agrario sustentable, se fomentaría al desarrollo rural, la seguridad alimentaria, un cuidado de los recursos naturales y del medio ambiente (Ramírez, 2013). Actualmente la agricultura tiene grandes dificultades para tener condiciones que permitan una estabilidad económica (Ramírez, 2013) ya que hay una creciente disminución de ingresos provenientes de las actividades agrarias provocando una mayor emigración y abandono de los terrenos agrícolas (de Grammont, 2009).

La importancia social agrícola se ve desfigurada por intereses principalmente económicos, sin tomar en cuenta el aporte productivo y la importante labor de conservación que genera con un correcto manejo de estas áreas (Aceves, 2000; Rubio, 2006); si olvidamos estos puntos es difícil que cambie la vulnerabilidad de producción y seguridad alimentaria que provoca una inestabilidad en los precios de los productos alimenticios (Ramírez, 2013).

Lamentablemente en nuestro país las actividades agrícolas están relacionadas con una calidad de vida decadente siendo un claro ejemplo de estancamiento y deterioro técnico que se traduce en una pérdida medioambiental aunado a una baja productividad (Sánchez, 2016). Las condiciones de pobreza bajo las que se vive en las comunidades agrícolas orilla a sus integrantes a buscar un mayor dinamismo en las ciudades de Puebla, Ciudad de México, a lo largo del sureste mexicano y en Estados Unidos, lo que da al estado una perspectiva urbano-rural (Ramírez, 2013).

Las características agrarias y de recursos en algunas zonas del estado limitan las dinámicas económicas de estas comunidades dentro del estado restringiendo una buena inserción en los mercados ya que hay políticas que no favorecen a este sector, una escueta inversión económica por parte del sector público y poca infraestructura que permita el desarrollo de ésta actividad (Ramírez, 2013) que a pesar de tantas adversidades aún es el principal sustento de gran parte de la población (Sánchez, 2016).

A ocurrido una diversificación agrícola en el valle de Puebla, donde los cultivos comprenden flores, forrajes, hortalizas, frutales, y cultivos básicos (maíz, frijol, trigo) esto en la búsqueda de un ajuste que permitiera mayores ingresos económicos frente a la pérdida de rentabilidad de la producción de granos. La demanda de la población está generando un proceso de integración en la producción de alimentos de la generación de características básicas como calidad, inocuidad, contenido nutricional, etc. (Aceves, 2000).

La evolución económica del país está reduciendo la importancia relativa del sector agropecuario, aunque al mismo tiempo, el crecimiento poblacional exige una producción de alimentos cada vez mayor. Aunque los sistemas productivos tienen un mayor dinamismo con la aplicación de las nuevas tecnologías (Santacolma, 2015). Los sistemas agrícolas son favorecidos por las características del medio físico permitiendo el establecimiento de comunidades agropecuarias productivas bajo condiciones diversas (temporal, humedad residual, riego) permitiendo sistemas productivos integrales de granos básicos, frutales, hortalizas y forrajes (Ayala, *et al.*, 2016).

Es importante fomentar la reinserción de especies nacionales y en la medida de lo posible que sean nativas, dichas especies deben contar con potencial de mercado para ayudar a reactivar la economía en las poblaciones agrícolas y así asegurar la variabilidad genética de manera natural, dándose así un equilibrio en las actividades antropocéntricas, referente a la producción primaria de alimentos, y el ambiente que nos rodea buscando un restablecimiento de las cadenas socioculturales las cuales son responsables del cuidado de la biodiversidad de sus zonas próximas (Rubio, 2006; Santacolma, 2015). La crisis económica y ambiental es notoria en la sobreexplotación de los recursos naturales ocasionando pérdida de biodiversidad además de un debilitamiento cultural y una marcada brecha regional por lo que importante la conservación *in situ* de los cultivos de especies nativas (Ayala, *et al.*, 2016).

Debido a la gran variedad climática y de relieves con los que contamos, hay una variedad de cultivos óptimos para impulsar en las distintas regiones del estado. Nos centramos en la técnica de modelado de nicho ecológico (MNE) de tres cultivos, uno de los cuales es considerado como parte de los cultivos estratégicos con potencial de mercado, el agave mezcalero (*Agave potatorum*) según lo consultado en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017.). Otra especie con la que se trabajó es el amaranto (*Amaranthus hypochondriacus*), ya que es considerado un cultivo rentable y se adecua a distintas condiciones ambientales (Ayala, *et al.*, 2016) y con la flor de muerto o cempasúchitl (*Tagetes erecta*) ya que tiene un gran arraigo sociocultural desde épocas prehispánicas en nuestro país y sigue siendo un distintivo nacional (Beltrán, *et al.*, 2012).

## Especies a trabajar

### *Agave potatorum*

(Zuccarini, 1833)

México es centro de origen de la familia *Agavaceae* con alrededor de 75% del total de la riqueza mundial, siendo la región del Valle de Tehuacán- Cucatlán (sureste estatal) una de las áreas con mayor diversidad de estas, ya que conserva una gran riqueza de grupos taxonómicos y filogenéticos. Puebla es el segundo estado con mayor diversidad con 31 especies, ocupando el primer lugar Oaxaca con 37 especies y el tercero Sonora con 30 (Pérez, *et al.*, 2016).

Los agaves tienen ciertas características que les permiten una gran adecuación a condiciones ambientales severas, algunas son: la presencia de espinas en los bordes de las hojas que les sirve como protección de depredadores, sus raíces poco profundas les permiten optimizar las escasas precipitaciones, la forma de sus hojas disminuye el área expuesta a la radiación solar y ayuda a direccionar el agua hacia el centro de la planta, su estructura permite la retención de grandes cantidades de agua por largos periodos de tiempo (Ledesma, 2014). Además aportan beneficios ecológicos como el mejoramiento del pH del suelo, ayudan a la retención de micro elementos, incrementan la cantidad de fósforo, potasio y materia orgánica generando buenas condiciones para el desarrollo de otras especies vegetales (García, 2007). Por lo que una alternativa para aquellas regiones que no tienen las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de la actividad agrícola es el *Agave potatorum* (Figura 1), el cual es utilizado para la elaboración del mezcal (López, *et al.*, 2016).

A pesar de que hay una gran variedad de especies que son utilizadas para la elaboración del mezcal, el obtenido del *Agave potatorum* tiene una mayor preferencia tanto de consumidores como de productores debido a las propiedades organolépticas que presenta, por lo que su destilado determina ingresos monetarios significativos para las familias campesinas (López, *et al.*, 2016), hay estudios que avalan que los productores de este destilado obtienen alrededor del 58% de la ganancia de producción (Torres, *et al.*, 2009).

Los agaves constituyen un grupo de plantas clave, tanto por su abundancia como por los recursos que confieren a los ecosistemas en los que se encuentran. La gran variedad de for-

mas, tamaños y colores, así como su majestuosa inflorescencia, hacen que no puedan pasar desapercibidos a los ojos del visitante, a tal grado que, junto con el chile, el maíz y el nopal, han sido considerados íconos de lo mexicano en todo el mundo. Los agaves han sido fundamentales en la alimentación y bebida de los antiguos mexicanos, además de proveerles fibras para todo tipo de uso, se han obtenido mieles, vinagres, se han utilizado como cercas vivas, para control de suelo, usos medicinales y con fines ornamentales; es tal el arraigo de los magueyes en nuestros pueblos que Hernán Cortés habló de ellos en su segunda carta de relación al rey Carlos V de España, diciendo:

*“venden miel de unas plantas que llaman en las otras islas maguey que es muy mejor que arrove, y destas plantas facen azúcar y vino que asimismo venden”*

En la actualidad, para los mexicanos modernos, los agaves representan una de las principales fuentes de ingresos del país, gracias a nuestras bebidas destiladas típicas: el tequila, los mezcales y el pulque (Macias, 2019; Delgado *et al.*, 2014).

**Figura 1. *Agave potatorum***

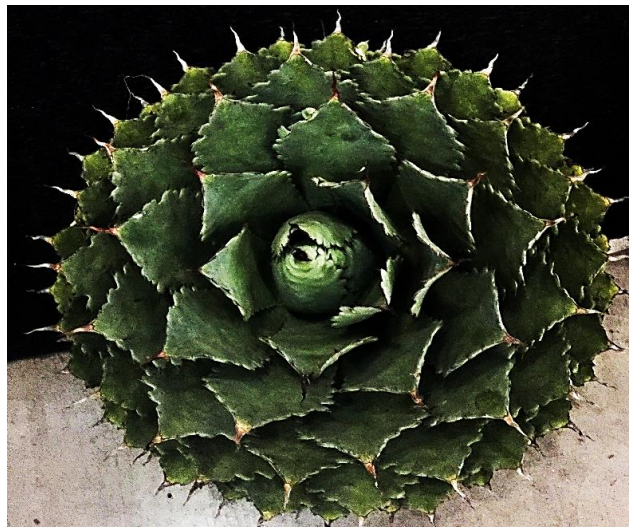


Figura 1. *Agave potatorum*. Nombre común maguey mezcalero (Arias , 2000). Fotografía: Propia

Según lo reportado por Colunga, *et al.*, 2007 hay 74 especies en México que son utilizadas para la producción de alimentos, bebidas espirituosas, fibras y forrajes, de las cuales entre 42 y 53 especies son utilizadas para la producción de mezcal; su proceso de elaboración se puede resumir como: (1) Recolección de las piñas de agave, (2) Cocimiento de la piña, (3) Molienda de la cocida, (4) Doble fermentación, (5) Destilación en alambiques de cobre y (6)

Maduración. Durante el cocimiento de las piñas ocurre el proceso de hidrólisis de los fructanos, obteniendo así la fructuosa que se fermenta de manera natural en un lapso de 1 a 2 días, posteriormente ocurre otra fermentación a partir de levaduras de distintos géneros (Castro, 2013).

La producción potencial del agave mezcalero para 2016 fue de 208.12 mil toneladas con la exportación de 2.71 millones de litros cuyo valor fue de 26.81 millones de dólares, y se estima que para el 2030 la producción llegue a 224.75 mil toneladas, con exportación de 2.93 millones de litros y un valor aproximado de 28.96 millones de dólares; esto teniendo como referencia los precios de 2016. El destino de las exportaciones del mezcal lo encabezan Estados Unidos y Taiwán sin olvidar que México encabeza la lista de exportadores de bebidas espirituosas con 165.874 millones de litros, seguidos por Corea del Sur con 76.035 y países bajos con 65.018 millones de litros (SAGARPA, 2017).

*Agave potatorum* es una de las especies que se visto una disminución en su población silvestre debido a la sobre explotación con fines de producción de mezcal, por lo que ha sido creciente la preocupación por asegurar su conservación a largo plazo (Aguirre, *et al.* 2013); este agave es endémico de Puebla y Oaxaca, su nombre común es maguey papalote o papalometl, tarda de 8 a 12 años en florecer y tiene una reproducción sexual. Presenta rosetas pequeñas con 50 a 80 hojas, su inflorescencia o quilete puede alcanzar de 3 a 6 metros de altura y habita en un rango altitudinal de 1 240 a 2 300 msnm. Las flores son de color verde claro a amarillo, específicamente en la zona Tehuacán- Cuicatlán, reporta una temperatura promedio anual de 21°C y una precipitación media de 407mm, se encuentra al sureste del estado de Puebla y al noroeste del estado de Oaxaca, los suelos predominantes son los de tipo volcánico y calizos (Torres, *et al.*, 2009). Este lugar es considerado como el área de mayor riqueza y diversidad de este género en México (García, 2007).

Con el uso de diversas tecnologías de percepción remota se realizará la caracterización de todas las variables ambientales necesarias que permitan un manejo y reconocimiento de la distribución de los recursos naturales, así como la evaluación de la capacidad productiva con la finalidad de diversificar las actividades agrícolas en relación con la oferta medioambiental (Ledesma, 2014).

## *Amaranthus hypochondriacus.*

(Linné, 1753)

El amaranto (Figura 2) tiene cierta resistencia a la sequía que le permiten ser considerada como alternativa de cultivo (Ayala, *et al.*, 2016). Se han encontrado vestigios en el Valle de Tehuacán, Puebla- México de domesticación de 500 años antes del descubrimiento de América (Espitia, *et al.*, 2010), este cultivo cuenta con un alto valor nutricional ya que contiene un elevado nivel proteico. Esto se puede utilizar para expandir su mercado. Su producción se desarrolla en la zona centro del país, donde destaca Puebla como uno de los principales productores, siendo un cultivo que se practica de manera tradicional y es el estado que presenta mayor rentabilidad del mismo (Garay, *et al.*, 2014).

El cultivo de este cereal constituye una fuente de empleo a nivel local y es un grano muy versátil para la industrialización y comercialización y ha habido un creciente interés en su consumo debido a sus altas propiedades nutricionales (Ayala, *et al.*, 2016). Es una planta de cultivo anual y su altura puede oscilar entre medio metro a tres metros, cuenta con un ramillete que forma muchas espigas con flores pequeñas que contienen pequeñas semillas que constituyen el producto principal de la planta de amaranto, su raíz presenta un engrosamiento irregular, puede alcanzar 2.4 m de profundidad y extenderse hasta 1.8 m, lo que explica su capacidad de recuperación (Espitia, *et al.*, 2010).

Actualmente su uso es con fines alimenticios. Tiene una alta cantidad de proteínas, entre 16 y 17% de proteínas que es mayor al que contiene el trigo, el arroz y el maíz con 12- 14%, 7- 10% y 9- 10% respectivamente, gran cantidad de minerales, vitaminas naturales: A, B, C, E, ácido fólico, niacina, calcio, hierro y fósforo. Así como una alta cantidad de lisina; además de su alto uso alimenticio y potencial agronómico y económico ya que a pesar de las fluctuaciones económicas no ha presentado rentabilidad negativa (Espitia, *et al.*, 2012, 2010; Olarte, *et al.*, 2015).

**Figura 2. *Amaranthus hypochondriacus***



Figura 2. *Amaranthus hypochondriacus*. Espigas que contienen las semillas que se comercializan.

Fotografía: Emmanuel Rodríguez Palma, 2016

A pesar de los distintos aportes nutricionales también tiene otras utilidades en varias ramas de la industria como colorante en la industria cosmética por su bajo contenido de lípidos, en la rama farmacéutica por su capacidad de controlar la encefalopatía hepática y ayuda en la desintoxicación del hígado, también su contenido de ácido L- Aspártico al combinarse con otros aminoácidos absorbe toxinas del torrente sanguíneo y por no contener gluten es recomendado ampliamente a personas celiacas (Espitia, *et al.*, 2010).

Se puede cultivar en todas las latitudes desde el nivel del mar hasta los 3 300 msnm con suelos con fertilidad media con una fuente de nitrógeno. Con climas cálidos con precipitaciones de 400 a 1 500 mm. (Espitia, *et al.*, 2010), tradicionalmente es un cultivo que se da en las regiones entre el ecuador y los 30° de latitud, su temperatura óptima es de los 16 a los 35°C., el mejor tipo de suelo es el franco bien drenados con un pH arriba de 6.

El amaranto tiene las características para ser considerado un cultivo esencial, de la misma importancia que el maíz (*Zea mays*), sorgo(*Sorghum spp.*), cebada (*Hordeum vulgare*), arroz (*Oryza sativa*). Con amplia variedad de aplicaciones, ofrece un mayor rendimiento al compararlo con otros granos de tradicionales el frijol, maíz, arroz o el trigo; se puede utilizar todo de la plantación del amaranto tanto el grano como las hojas, pueden ser consumidas como verduras o el tallo sirve como forraje para los animales, a tal punto que, en las principales zonas productoras, los valles altos, la producción de este grano es la base de la

economía (Díaz, 2014; Espitia, *et al.*, 2010). El amaranto es considerado un cultivo nativo de Mesoamérica donde se ha cultivado desde el 5 000 años a.C, el amaranto (*o huauhtli*) era considerado un cereal con un alto significado social, religioso y económico antes de la Conquista y era valorado en la misma proporción que al cultivo del maíz y el frijol; es un pseudo grano de gran arraigo en nuestra sociedad por que a pesar de todos los años transcurridos sigue manteniéndose dentro de la preferencia de la población (Martínez *et al.*, 2016).

### *Tagetes erecta*

(Linné, 1753)

Esta especie mejor conocida como cempasúchil (Figura 3), es considerada de origen mexicano al igual que su domesticación (Colín, *et al.*, 2012). Algunas características con las que podemos identificar a esta especie es el color de lígulas que van de naranja a amarillo, el receptáculo es campanulado, presenta un borde foliar aserrado, el color de la hoja es verde claro y su tallo es verde, el ángulo de la rama va de 20° a 30° y cuenta con pocas glándulas foliares secretoras de aceite (Serrato, *et al.*, 1998).

Tiene un alto valor cultural ya que entre otros usos, es empleada en festividades de arraigo nacional (Rodríguez, *et al.*, 2012); dentro de este género existen 26 especies descritas de las cuales, 24 se encuentran en el territorio nacional (Barajas, *et al.*, 2011). *Tagetes erecta* es la especie más popular del género debido a la coloración de sus inflorescencias.

**Figura 3. *Tagetes erecta***



Figura 3. *Tagetes erecta*.. Floración de *Tagetes erecta*, nombre común flor de muerto.

Fotografía: Propia

También destaca otros usos que le dan una mayor importancia de mercado como: fuente de xantofilas utilizadas en la avicultura, ya que se relaciona la pigmentación de estos productos con la aceptación en las dietas mexicanas (Martínez, *et al.*, 2004), tiene fines antimicóticos ya que se ha descrito que actúa sobre 8 especies de fitopatógenas, inhibiendo el crecimiento micelial en más de un 95% (Barajas, *et al.*, 2011), puede ser utilizado como larvicida, insecticida o nematocida (Alemán, 1968), a pesar de su importancia agrícola y cultural desempeña papel en el área médica ya que sirve para el tratamiento de enfermedades dermatomucosas y el tratar algunos tipos de úlceras oculares, contra la pulmonía, dolores del vientre, goza de propiedades purgantes, antiparasitarias (Roca, *et al.*, 2009), entre otras que se pueden observar en el cuadro 2.

*Tagetes erecta* es importada al extranjero principalmente a Estados Unidos y Canadá, aunque también se ha exportado a Guatemala, Italia y Países bajos, dentro de los principales estados productores se encuentra Puebla con una superficie de siembra de 1 704 ha, con lo que se coloca como principal productor a nivel nacional con el 76.6% (con 17 070 toneladas), en segundo lugar Hidalgo con un 5.7%, en tercero Guerrero con el 5%, en cuarto San Luis Potosí con un 3.9% y en quinto Tlaxcala con 3.1% del total a nivel nacional para el 2018, de igual manera se registró un precio parcelario de entre \$2 900.00 y \$3 300.00 por tonelada (Gómez Gómez *et al.*, 2014; SIAP, 2019).

**Cuadro 2. Usos medicinales de *Tagetes erecta***

<b>Padecimiento</b>	<b>Parte usada</b>	<b>Preparación</b>
<b>Afrodisiaco</b>	Jugo, hojas basales	Molido con agua o vino, tomado
<b>Aperitivo</b>	Hojas	Molido con agua
<b>Vomitivo</b>	Hojas	Molido con agua o vino
<b>Reducir fiebre</b>	Jugo, hojas	Molido
<b>Anticonvulsivo</b>	Toda la planta	Hervido y tomado
<b>Quemaduras</b>	Ramas	Molido en agua, baños
<b>Granos amortajados</b>	Ramas	Hervido, lavados
<b>Supuración ocular</b>	Hojas y flores	Infusión, lavados

<b>Orzuela</b>	Hojas y flores	Infusión, lavados
<b>Para regular la menstruación</b>	Jugo y hojas	Molido
<b>Relajante muscular</b>	Planta entera	Cocido y tomado
<b>Bilis</b>	Flor entera	Hervido y tomado

Fuente: Adaptada de *Origen, naturaleza y usos del cempoalxóchitl*. (Castro, et al., 1994).

# Justificación

Las distintas condiciones de desigualdad y pobreza han generado una dependencia por el ancho poblacional a subsistir en gran medida de los recursos naturales disponibles, lo que ha provocado grandes problemas de contaminación y agotamiento de los recursos naturales que tienen impacto socioeconómicos y ambientales creando un debilitamiento cultural y un mayor empobrecimiento de las comunidades.

Las especies que se trabajaron cuentan con un alto potencial agronómico y tienen una tendencia positiva en el mercado, tanto nacional como internacional, por lo que es importante un adecuado manejo de los recursos naturales y agrícolas para fomentar los productos obtenidos, su potencialidad agrícola e incrementar su calidad.

Buscando la conservación del patrimonio biocultural del estado conservado principalmente por las comunidades rurales esto mediante la práctica de sus conocimientos y alto sentido de arraigamiento hacia su entorno; el proyecto se realizó con la finalidad de reconocer sitios que garanticen el óptimo potencial agrícola de los cultivos y convertirse en detonadores del desarrollo local en dichas comunidades, permitiendo una mejora en su calidad de vida.

# Objetivos

## Objetivo General

Localizar mediante herramientas geoinformáticas que conforman la agricultura de precisión las áreas dentro del estado de Puebla potenciales para el desarrollo de cultivo de *Agave potatorum*, *Amaranthus hypochondriacus* y *Tagetes erecta*, los cuales, cuentan con un alto potencial de mercado nacional e internacional.

## Objetivos específicos

1. Recopilar y analizar geográficamente las características ambientales propias de cada cultivo estudiado.
2. Localizar a través de los modelos de nicho ecológico las zonas con características ambientales óptimas para cada uno de los cultivos.
3. Investigar la ubicación de zonas agrícolas ejidales así como las principales vialidades estatales para corroborar la factibilidad e impacto de la investigación

## Zona de estudio

El estado de Puebla, en el cuál se trabajó para el desarrollo de esta tesis, cuenta con una superficie total de 3 426 966 hectáreas dentro de las que encontramos distintos grupos de vegetación (Fig. 4), siendo los mayormente predominantes los agrícolas, selváticos y boscosos, estos cuentan con una distribución del 46.9%, 19.4% y 17.5% en el territorio y en suma ocupan el 83.8% del territorio estatal (INEGI, 2017); se cuenta con una población rural dentro del estado del 28%.

**Figura 4. Superficie vegetal de Puebla**

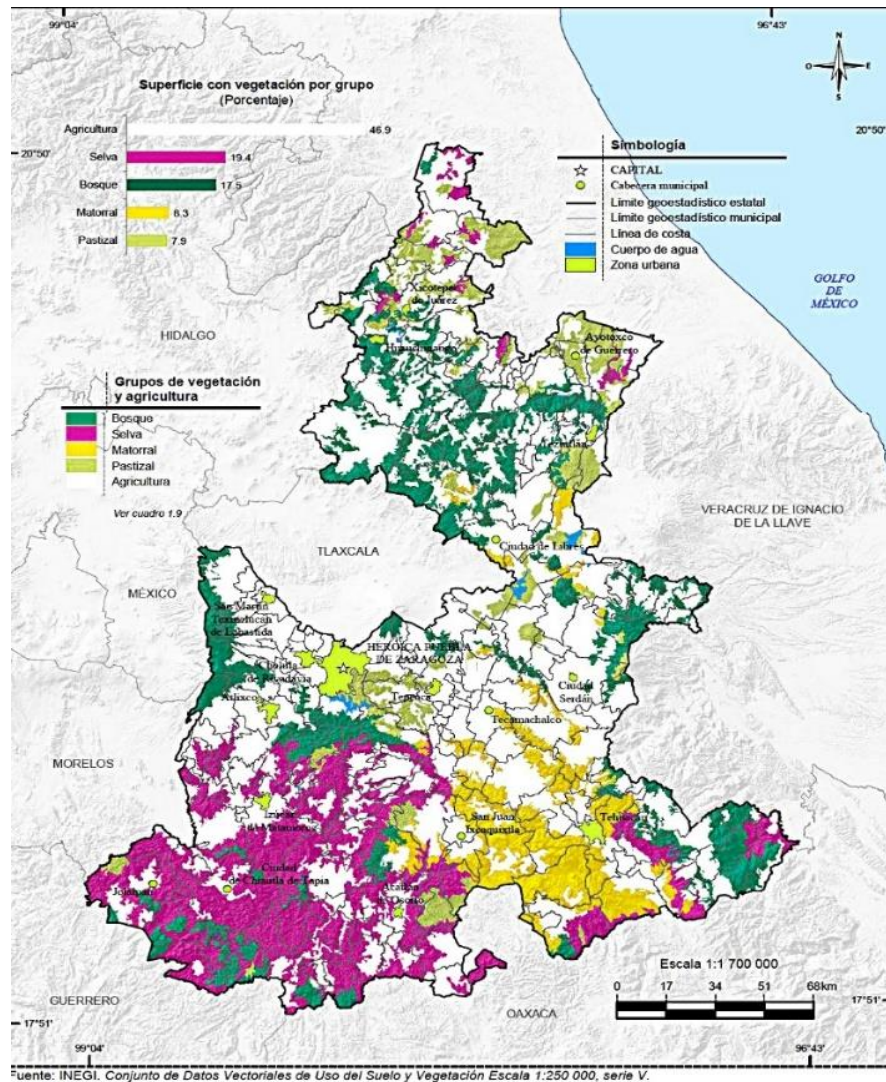


Figura 4. Superficie vegetal de Puebla. División de la superficie estatal por los grupos vegetales presentes (INEGI, 2017).

La población dentro del estado dedicada a las actividades agrícolas en el 2015, según lo reportado por el INEGI (2016) era del 11.1%; siendo los principales cultivos producidos el de hortalizas, maíz, café, caña de azúcar, alfalfa, flores.

El estado de Puebla cuenta con una alta variedad climática que permiten su división en regiones, de las cuales el 35% del estado cuenta con clima templado subhúmedo en la zona central y sureste, 25% es cálido subhúmedo en la parte norte y sureste, 19% cuenta con clima seco y semi seco en el sur y centro oeste, 14% del estado cuenta con clima cálido húmedo en la región norte y sureste, 7% es templado húmedo en la región norte y una pequeña porción al sureste y un 0.2% de clima frío o semifrío en la cumbre volcánica. Considerando toda esta variación se puede decir que Puebla cuenta con un clima templado subhúmedo (INEGI, 2017).

En cuanto a la topografía se pueden encontrar llanuras y lomeríos en la zona central las cuales separan las sierras en dirección noroeste- sureste generando regiones con 3 260 msnm a 4 540 msnm; al mismo tiempo Puebla cuenta con cañones donde se puede encontrar la altitud más baja registrada para el estado con 100 msnm, esto entre la Sierra Negra y el cerro Zinzintéptl; en la zona de los volcanes se pueden encontrar altitudes hasta los 5 610 msnm (INAFED, 2017; INEGI, 2017).

Toda la heterogeneidad abiótica con la que cuenta el estado brinda la posibilidad del desarrollo de una amplia variedad de crecimiento de vida silvestre, dotándole así la oportunidad de ser una región con una gran riqueza cultural que debe ser rescatada y aprovechada y así frenar un poco la sobreexplotación e intoxicación de los recursos por un mal manejo de los mismos.

## Marco teórico

### Agricultura de Precisión

La agricultura de precisión nos permite modificar el enfoque que se tiene de la aplicación de las nuevas tecnologías en el área agrícola ofreciéndonos una visión que permite una valoración de las unidades de producción como un reservorio inmenso de información (Best *et al.*, 2008).

La agricultura de precisión consta de distintas etapas como se aprecia en la Figura 5 (Bongiovanni *et al.*, 2006; Reynolds *et al.*, 2014), siguiendo esta metodología podemos sugerir mejoras a los productores.

**Figura 5. Metodología de Agricultura de Precisión**

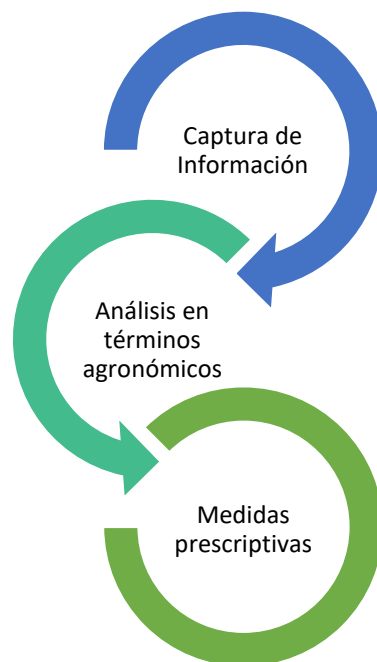


Figura 5. Metodología de Agricultura de Precisión. Se observan los elementos metodológicos propios de este enfoque.

Un ejemplo lo encontramos en Sinaloa en el cultivo de papa, el cual depende su calidad y rendimiento del manejo del riego que tengan las áreas de cultivo, generando altos costos de

producción provocado por la variabilidad climática complicando el manejo tradicional de los cultivos, mediante el desarrollo de una plataforma para la gestión hídrica basada en TIC's (Tecnologías de Información y Comunicación), herramientas de AP, que incrementó la producción en un 16% en solo un año (Sifuentes *et al.*, 2016).

Actualmente existe una gran difusión sobre la capacidad potencial de la AP para aumentar la productividad de los cultivos y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental que tienen este tipo de actividades, lo que ha generado el interés en el desarrollo de estas tecnologías con fines agrícolas (Mitchell *et al.*, 2018).

Utilizando imágenes satelitales y técnicas percepción remota (tecnologías de AP) se ha mejorado la gestión de agua junto con técnicas agrícolas tradicionales en cultivos cañeros logrando su máxima producción al tiempo que se han minimizado los insumos derivados de los combustibles fósiles, esto en la Huasteca Potosina en México (Aguilar, 2015).

Se sabe que la industria azucarera en Veracruz enfrenta fuertes problemas agrícolas derivados del uso de las practicas convencionales de manejo agrícola, cambio climático, entre otros. Mediante el desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan a la sostenibilidad económica y ambiental que permitan el desarrollo de recomendaciones orientadas a la búsqueda de la estabilidad de estas áreas con el fin de mantener la rentabilidad de estas áreas a largo plazo (Aguilar, *et al.*, 2015).

La aplicación de herramientas de AP, como son: la teledetección y el modelado científico permite mejorar el manejo de malezas haciéndolo eficiente, dirigido, específico y económico en un futuro, siendo que el escenario actual agrícola debe ir dirigido a prácticas mas sostenibles evitando a medida de los posible el uso de agroquímicos en grandes extensiones de tierra gracias a que debido a la heterogeneidad espacial en la infestación de malezas proporciona la base para la aplicación de estos sistemas (Bajwa *et al.*, 2015).

Actualmente la dificultad en el manejo de esta información radica en la identificación de las zonas de manera remota y en la toma decisiones adecuadas. Para la identificación de las zonas se hace uso de distintos instrumentos tecnológicos como el GPS, uso de imágenes satelitales, captadores, moduladores, software especializado y sensores, entre otros (Marote, 2010).

El uso del GPS ha permitido la creación de mapas más precisos, así como la monitorización de diversos fenómenos naturales como los movimientos de la corteza terrestre, migraciones

de animales, etc. Enriqueciendo y generando distintas líneas de investigación y de aplicación, como la agricultura de precisión, debido a que tiene diversas herramientas que nos permite conocer con gran exactitud la variabilidad espacial y temporal del suelo y de distintos factores que afectan a los cultivos(Reynolds, *et al.*, 2014).

Mediante la utilización de SIG, técnicas de percepción remota y otras tecnologías propias de AP se logró la determinación óptima de las áreas para el desarrollo de *Agave spp.* En San Felipe- Guanajuato, México generando así una propuesta que disminuya la fragmentación presente dando certeza a la inversión pública y privada en la zona, siendo eje central la sustentabilidad de dicho recurso y el desarrollo social y económico de la región (Ledesma, 2014).

Se sabe que, en Misantla, Veracruz, utilizando SIG (Sistemas de Información Geográfica) se reubicaron los sitios de trashumancia para no afectar las principales zonas apícolas en la región la cual tiene un importante peso para los pobladores de la localidad (Roque *et al.*, 2016).

En Veracruz mediante técnicas de AP (Percepción remota, GPS, SIG) se han determinado las tierras de cultivo de caña de azúcar para llevar un manejo agroecológico direccionando los sistemas de riego, reestructurando los mecanismos de fertilización, compostaje, gestión de plagas y enfermedades permitiendo a los productores cañeros incrementar la productividad de materia prima aminorando las limitantes que obstaculizan las facultades de las áreas de cultivo (Aguilar, 2015).

Hubo una mejora en la aplicación de abonos tanto orgánicos como químicos a nivel parcelario en el ingenio azucarero de Atencingo, Puebla incrementando la producción cañera de 1.5 a 1.7 millones de toneladas en un año, encaminando las prácticas agrícolas hacia la sustentabilidad mediante la implementación de herramientas provenientes de la agricultura de precisión (Pérez *et al.*, 2016).

## Imágenes MODIS

El uso del Sensor del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) es una fuente ampliamente usada por investigadores y personas encargadas del monitoreo y gestiones medioambientales dado permiten trabajar con una gran cantidad de información recopilada diariamente de la biomasa existente (Nakano *et al.*, 2013; Paltsyn *et al.*, 2017).

La teledetección satelital puede sustentar el manejo adecuado de bastas extensiones de tierra ya que permiten análisis espectrales que responden a la cantidad y vigor de la vegetación verde mediante el uso de imágenes MODIS y servir como guía en la toma de decisiones con la finalidad de aumentar la confianza de las comunidades interesadas en el mejoramiento de la gestión de las zonas de interés (McGwire *et al.*, 2017).

MODIS es un espectrofotómetro en órbita que captura imágenes diariamente desde 1999, tiene 7 bandas espectrales en el rango de 0.4 a 2.5  $\mu\text{m}$ . Lo que le permite observar la superficie terrestre con resoluciones espaciales de 250m (bandas 1 y 2) o 500m (bandas 3 y 7) (Klein *et al.*, 2002).

Dado que las zonas agrícolas son complejas y ésta complejidad se acentúa aun más bajo un enfoque agroecológico es importante evaluar las características de estos sitios y las modificaciones ambientales que han sufrido a través del tiempo, una herramienta de gran apoyo para estos fines, son los Índices Normalizados de Vegetación (NDVI) que son obtenidos mediante productos de diversos sensores, en este estudio se utilizaron imágenes MODIS ya que han sido utilizados de manera exitosa en diversos estudios de fenómenos naturales y agrícolas dado que involucran información de la cubierta vegetal a diversas resoluciones espaciales 1000, 500 y 250m; el uso de MODIS de resolución de 250 m ha sido un producto efectivo para fines agrícolas (Bellón *et al.*, 2017; Mugabowindekwe *et al.*, 2018)

Hay evidencia que respalda el análisis de cubiertas vegetales con gran precisión partiendo del uso de MODIS a 250m ya que son datos tomados cada 16 días, esta periodicidad minimiza alteraciones posibles debido al ángulo solar y reflectancia teniendo una excelente dinámica espacial y temporal de la vegetación (Guindin *et al.*, 2012).

Los datos obtenidos a través de imágenes satelitales que se utilizan para la realización de modelos y simulaciones son obtenidos a partir de predicciones numéricas haciéndose esto posible gracias a la combinación de métodos matemáticos que permiten la creación de una buena representación coherente de la complejidad del medio (José-Silva *et al.*, 2018) favoreciendo la elaboración de estudios de impacto ya que complementa la recolección de datos a escala espacio- temporal.

Diversos estudios se han realizado con la finalidad de saber la efectividad del uso de imágenes satelitales dentro de los cuales se ha demostrado un excelente ajuste en cuanto a comparaciones temporales por lo que son un excelente recurso para evaluar distribución, así como facilitar la localización en campo de zonas de ocurrencia ya que tienen una alta precisión en la predicción de zonas de idoneidad ambiental, sin embargo, hay que tener en cuenta que la precisión depende de la resolución de la imagen de entrada. Por lo que representan un gran aporte para la validación de modelos ecológicos ya que facilita la validación de los modelos en campo reduciendo el riesgo de inversión de recursos (José-Silva *et al.*, 2018).

Los sistemas satelitales pueden aportar información detallada acerca del uso de la tierra en grandes áreas. A través de series temporales de índices de vegetación obtenidos por teledetección permiten la realización de estudios que consideren las variaciones estacionales e interestacionales de suelos de uso agrícola, permitiendo diferenciar algunas prácticas de manejo dependiendo de la escala a la que se trabaje (Bellón *et al.*, 2017).

El uso de imágenes MODIS es esencial para el mejoramiento de mapas ya que abre la posibilidad de muestreos estratificados para realizar trabajos amplios dado que cubre grandes áreas de manera oportuna y facilita la cuantificación de tasas de cambio de las áreas de estudio de igual manera pueden crearse estudios de tendencia, determinación de la contribución de los factores de perturbación, entre otros. Ya que son un gran recurso para ilustrar la variabilidad espacio- temporal y pueden servir de ayuda en la toma de decisiones; debido a las múltiples aplicaciones que puede tener el uso de imágenes MODIS se han desarrollado diversos algoritmos para hacer más eficiente la información obtenida de ellas (Potapov *et al.*, 2008; Sulla-Menashe *et al.*, 2014).

Este tipo de imágenes permite la captura de información a detalle de manera espacial dentro de un paisaje así como la incorporación de datos de alta frecuencia de manera temporal para

describir los cambios a través del tiempo dando como resultado una herramienta integradora y exitosa para el monitoreo de patrones en la cobertura vegetal y sus usos (Hilker *et al.*, 2009).

## Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Es un indicador del crecimiento de vegetación y cobertura verde que son un componente de los ecosistemas terrestres; este índice se ha utilizado en la evaluación de diversas características espaciotemporales dado que permite trabajar con diferencias de reflectancia espectral que a su vez reflejan diversos factores ambientales en una escala espacial y temporal amplias (Zhang *et al.*, 2015); partiendo de un análisis de NDVI se logró la caracterización de la dinámica de la vegetación permitiendo examinar cambios en cuanto a la variabilidad espacial y cobertura vegetal encontrando un retraso en la estación de crecimiento que no siempre está ligado a estaciones más cortas (Gaitán, *et al.*, 2015).

A través de los índices de vegetación espectral se puede llegar a una gestión y utilización sostenible de recursos naturales y agrícolas evitando su degradación y la disminución de cobertura vegetal, siendo uno de los más utilizados el NDVI y se usa ampliamente para estimar cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, permitiendo su uso como un estimador indirecto de la productividad primaria neta, esta herramienta junto con SIG permiten un mapeo y monitoreo para la correcta construcción medioambiental (Candiago, *et al.*, 2015; Gaitán, *et al.*, 2015).

La información obtenida del NDVI es mediante:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}),$$

Donde, NIR es la reflectancia de las bandas infrarrojas y RED significa la reflectancia de las bandas visibles del espectro electromagnético; por lo que, la vegetación viva absorbe las ondas azules y rojas de la luz solar y refleja la mayor parte del espectro verde de la misma. La vegetación enferma- moribunda, absorbe en su mayoría la banda verde y refleja las azules y rojas. En cuanto mayor sea el valor de NDVI mayor es NIR y RED menor, por lo que la zona de estudio tiene una mayor vegetación (Xu *et al.*, 2019). A través de los valores

obtenidos a partir de NDVI y sistemas de teledetección se encontró una relación entre humedad, acidez y altura en una parcela usada para la producción de caña de azúcar en Colombia, en donde la acidez aumentaba conforme se incrementaba la altura esto se debe a la naturaleza geofísica del terreno (Rueda, *et al.*, 2015).

El uso de NDVI para la identificación y monitoreo de diversas características medioambientales es fundamental para la protección y desarrollo de herramientas que busquen la protección de ambientes ecológicos y su mejoramiento en zonas grandes ya que eficientiza la obtención de información objetiva de manera continua ,ya que trabaja con series temporales, a la vez que disminuye el rango de error al compararlo con una investigación de campo, por lo también hay una reducción de costos (Gómez *et al.*, 2019; Liang *et al.*, 2017).

A través de los valores obtenidos a partir de NDVI y sistemas de teledetección se encontró una relación entre humedad, acidez y altura en una parcela usada para la producción de caña de azúcar en Colombia, en donde la acidez aumentaba conforme se incrementaba la altura esto se debe a la naturaleza geofísica del terreno (Rueda, *et al.*, 2015).

El uso de detección remota brinda información precisa y accesible sin importar la ubicación y el desarrollo económico del país, la implementación de estas herramientas para predecir, por ejemplo, rendimientos de los cultivos, tiene un gran potencial de ser aplicado en países menos desarrollados de manera rentable si se compara con técnicas más tradicionales como son las encuestas que requieren más recursos económicos y mucha más mano de obra (Gumma *et al.*, 2018).

Basándose en imágenes NDVI se detectaron diferencias en la producción de biomasa en cultivos de maíz, con la información obtenida se logró un incremento del 10% en la etapa reproductiva con una redistribución de agua en el terreno estudiado (De la Casa, *et al.*, 2017).

Utilizando imágenes MODIS y NDVI se realizan monitoreos de los impactos negativos en los cultivos de maíz y cómo afecta su rendimiento en los principales estados productores de EEUU según lo reportado por (Shrestha *et al.*, 2017).

## Modelado de Nicho Ecológico

Las distintas herramientas que conforman la AP permiten, entre otras cosas, la generación de modelos que agilizan la predicción certera de la distribución de las especies mediante la recolección espacio- específica de las características que permiten la presencia de las especies, nicho ecológico, promoviendo al modelado como herramienta fundamental para abordar problemáticas de distintas áreas (Ibarra, *et al.*, 2012) pudiendo enfocar de manera correcta las soluciones de tal forma que no sean tan radicales con el entorno que lo rodea.

Se puede decir que el nicho ecológico es la suma de requerimientos de las características de un hábitat que tiene una especie, reconociendo las limitantes de recursos abióticos enfatizando las adaptaciones fisiológicas (G. Navarro, *et al.*, 2003).

Por lo que el Modelado de Nicho Ecológico (MNE) permite analizar distintos factores ambientales asociados a las poblaciones de determinada especie, ésta información después de ser evaluada bajo diferentes algoritmos permite una proyección geográfica (Figura 6) identificando los sitios adecuados para la supervivencia de las poblaciones de una especie bajo distintos escenarios espacio- temporales (Martínez, 2010).

Gracias al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten el reconocimiento de diversas características como pueden ser: condición, historia, distribución, monitoreo, etc., se ha permitido una mayor diversificación tecnológica que ha hecho posible la realización de modelos de predicción de especies (Becerra *et al.*, 2016) que junto con los sistemas de guía de mecanización de predios (GPS, DGPS, etc.), sensores de evaluación, satélites, microsatelitales junto con diversas evaluaciones de variables de producción, asociados al cambio climático, podemos sugerir mejoras a los productores (Elith *et al.*, 2006) ya que se analizan las interacciones entre el espacio ecológico y geográfico.

El MNE ha permitido acelerar el rango de respuesta a las preguntas que se abordan desde distintas disciplinas facilitando la toma de decisiones referentes a conservación y manejo de organismos u áreas específicas ya que ayudan a un mejor entendimiento de una situación en distintas escalas espacio- temporales (Cuervo *et al.*, 2017).

Debido a que los modelos permiten sintetizar relaciones entre especies y variables ambientales las cuales serían difíciles de interpretar de otra manera, la investigación se ha

visto enormemente beneficiada ya que la única limitante para la construcción de modelos realistas es la comprensión que se tenga de los sistemas ecológicos y la disponibilidad de los datos. A pesar de estas limitantes, el MNE ha sido de gran utilidad para la comprensión, predicción y modelado de la distribución de especies, por lo que deben ser considerados como un método de acercamiento a las distintas problemáticas (Becerra *et al.*, 2016) que enfrenta el agro mexicano.

**Figura 6. Diagrama general para la realización de MNE**

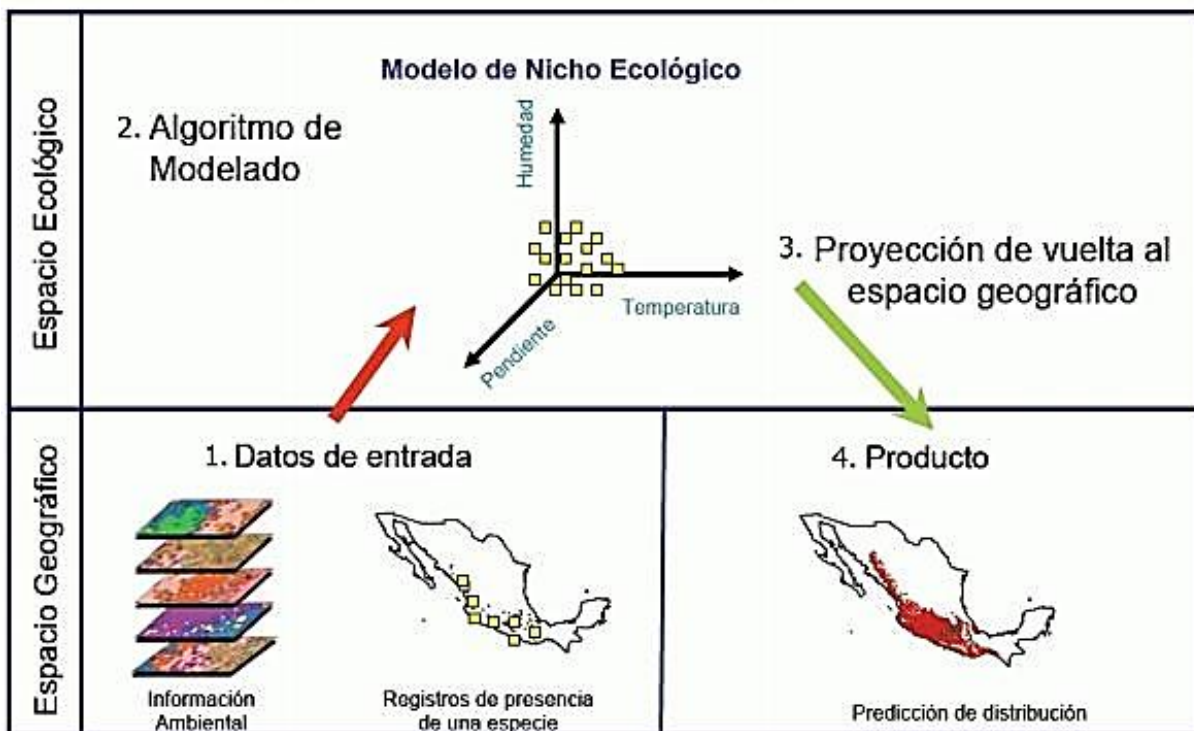


Figura 6. Diagrama general para la realización de MNE. (1) Se necesita ingresar información ambiental y datos de presencia para (2) una evaluación matemática que permita (3) una proyección geográfica y tener finalmente (4) una predicción acertada. Adaptado de Martínez, 2010.

Las técnicas de MNE permiten georreferenciar aquellos sitios que cuentan con las características idóneas para el establecimiento definitivo o temporal de una especie dependiendo de diversas variables ambientales (Varela *et al.*, 2014).

Una manera de expresar lo anterior es a través del diagrama BAM donde se muestra que las regiones donde se puede observar la especie cuentan con las condiciones ambientales

necesarias (A), las condiciones bióticas de la especie como especies dispersoras, polinizadoras, competidoras, etc. (B) y que sean accesibles para la especie de interés (M). Por lo tanto, se puede decir que el MNE es una herramienta compleja que permite mostrar un sitio con altas probabilidades de tener la presencia de una especie (Soberón *et al.*, 2017), el diagrama es adaptable dependiendo del tipo de organismo que sea objeto de estudio, en el caso de especies agrícolas el diagrama queda representado como en la Figura 7.

**Figura 7. Diagrama BAM para especies agrícolas**

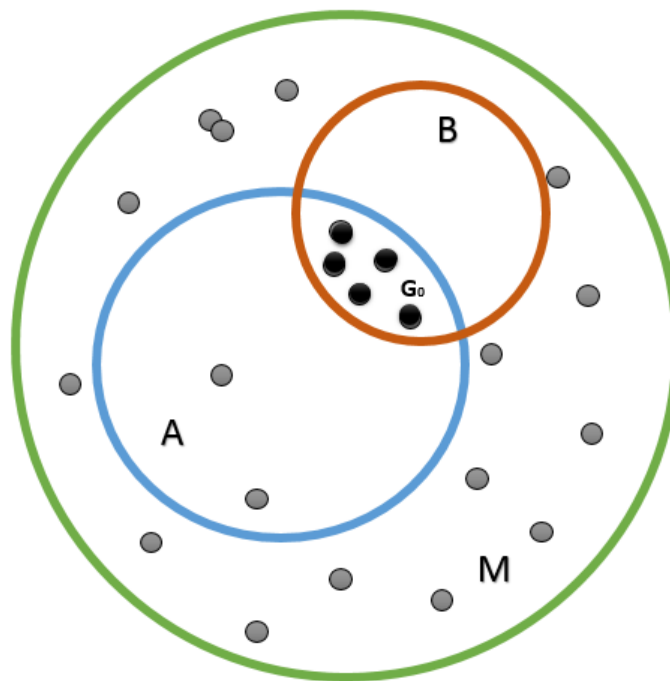


Figura 7. Diagrama BAM para especies agrícolas. En donde  $G_0$  = área ocupada. Adaptado de (Soberón, *et al.*, 2017).

Es evidente la necesidad de la aplicación de las tecnologías geoespaciales para ayudar a cubrir los requerimientos crecientes de la población en busca de la sustentabilidad impulsando así a los productores a realizar un acercamiento a las tendencias agrícolas globales con el fin de reducir costos de producción cuyo objetivo es la obtención de un producto inofensivo tanto para el medio ambiente como para la salud humana que sea de calidad y a su vez sea rentable (Bongiovanni *et al.*, 2006).

Se ha reportado modelos de distribución, bajo el concepto de nicho ecológico, dependiendo del cambio climático sobre la distribución actual y potencial de *Spondias purpurea* y *Spondias mombin*, ambas especies mexicanas; del cual se reportó una disminución de 12.2% de superficie apta considerando ambas especies, las superficies aptas disminuirán un 5.7% y 13.3% respectivamente siendo *S. mombin* la más sensible (Arce *et al.*, 2017).

Por medio de técnicas de modelado de nicho ecológico se han realizado estudios sobre el impacto que genera la introducción (actividad antropocéntrica) de especies exóticas en el medio ambiente, que ha servido para generar una agenda de estrategias a seguir para aminorar el daño que causan este tipo de acciones, un ejemplo de esto es el trabajo que se realizó con el olivo ruso, *Elaeagnus angustifolia*, en el oeste de Estados Unidos y suroeste de Canadá (Collette *et al.*, 2015).

Por lo tanto, los modelos de nicho ecológico brindan un enfoque para estimar un objeto complejo dentro de un universo de entornos posibles teniendo en consideración posibles efectos, interacciones bióticas y la complejidad de que ya tienen los medios naturales por lo que son útiles para producir, entre otras cosas, estimaciones distributivas potenciales, basándose en datos de ocurrencia y modelos climáticos (Cobos *et al.*, 2019).

## Kuenm

Es necesario crear más de un ajuste de parámetros ya que normalmente las estadísticas descriptivas se realizan únicamente con Maxent, sin embargo, con la asociación del paquete estadístico Kuenm habilitado para R ayuda a los usuarios a realizar la mayor parte de pruebas estadísticas necesarias para la elaboración y corroboración de los modelos de nicho ecológico de una manera más práctica, sin la necesidad de agotar, por la realización de estas pruebas, la capacidad de memoria y RAM de los equipos computacionales que realizan estos estadísticos, al mismo tiempo este paquete reduce considerablemente el tiempo de procesamiento ya que automatiza los procesos a seguir dando la posibilidad de trabajar con múltiples modelos a la vez (Cobos *et al.*, 2019).

Este paquete permite calibraciones detalladas por lo que la selección de modelos se basa en la complejidad que genera un mejoramiento en la capacidad predictiva y nivel de complejidad

del modelo, también trabaja con una robusta sucesión estadística para la evaluación de los modelos brindándole solidez a las predicciones; también permite una mejor administración parámetros con que el usuario trabaja agilizando todo el desarrollo de los mismos (Cobos *et al.*, 2019).

La realización de calibración, elaboración y evaluación de un modelo de nicho ecológico de manera convencional implica una gran inversión de tiempo (varias semanas), por lo tanto, la automatización de esto es crucial pero el desarrollo y mejoramiento de estas técnicas y tener una mejor interpretación de los resultados (Cobos *et al.*, 2019).

## Evaluación Multicriterio

La Evaluación Multicriterio (MCE, por sus siglas en inglés Multi- Criterial Evaluation) es un conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional mediante la combinación y transformación de datos geográficos de entrada en una decisión resultante que satisfaga el objetivo considerado mediante la simplificación. La información geográfica son datos georreferenciados organizados de manera temática, representando las características del mundo real, por lo que los sistemas de información geográfica dan soporte a las decisiones espaciales (Drobne *et al.*, 2009).

Este tipo de evaluaciones se puede llevar a cabo utilizando plataformas tipo SIG , uno de ellos es IDRISI a través del módulo MCE, el cual incluye varios apartados específicos que cubren los procedimientos requeridas para llevar a cabo el análisis para la toma de decisiones sobre la asignación de recursos (Eastman, 2016).

La EMC permite integrar distintas variables geográficas a una escala compatible con la resolución de la serie cronológica que se trabaja, las variables pueden ser determinantes o factores de aptitud para llevar a cabo una sumatoria lineal, mediante una evaluación de alternativas (Figura 8), que ofrece como resultado mapas que expresan la capacidad de acogida del territorio para cada categoría dependiendo el objetivo planteado (Paegelow, 2003).

### Figura 8. Evaluación Multicriterio

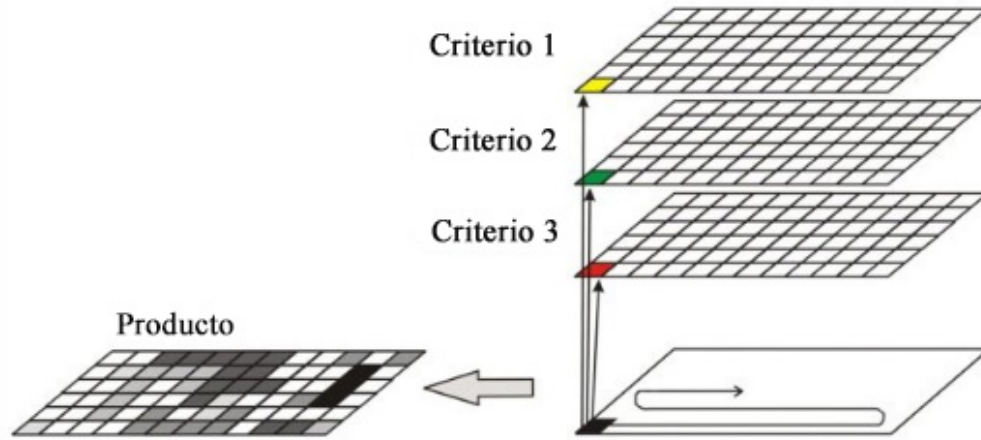


Figura 8. Evaluación multicriterio. Representación gráfica de la suma lineal de las variables, obteniendo como producto lineal áreas de idoneidad que representan los criterios según su desempeño. Adaptado de Drobne *et al.*, 2009.

# Metodología

## Datos de ocurrencia

La obtención de los datos de ocurrencia de las especies ha sido a través de diversos portales de información como son: CONABIO, GBIF y BioCASE, estas bases de datos ofrecen la información de manera gratuita, facilitan el acceso y manipulación a datos ya que presentan la información de manera completa y de manera integral que es recuperada de observaciones y registros históricos (Robertson, *et al.*, 2014).

A los registros obtenidos dentro del lapso de años que va de 1970 a 2018 se les realizó una limpieza exhaustiva con la finalidad de trabajar solo con aquellos que fueron obtenidos mediante georreferenciación a través de GPS evitando inconsistencias, errores de conversión, duplicación de datos, todo esto cumpliendo con una auto correlación lineal de 250 metros con la finalidad de brindarle heterogeneidad espacial y ambiental a la base de datos propiciando diferencia entre las variables que se trabajaron, reduciendo el sesgo espacial con una relación 1:1 (Fortin, *et al.*, 2014) quedando con 162 registros para *Agave potatorum*, 58 para *Amaranthus hypochondriacus* y 59 para *Tagetes erecta*. Esto se realizó con el software Microsoft Excel, 2016 y ArcMap versión 10.5 (Figura 9). La consideración del periodo tomado para la toma de los datos de presencia de las especies fue debido a que si se tomaba un periodo menor la base de datos no tendría la solidez para realizar una buena predicción de las zonas de interés.

Posteriormente en ArcMap se generaron buffers a 10km para delimitar el área de influencia de las variables ambientales, para después proceder a la generación de polígonos y obtener la información específica de las variables y con ello determinar las características del hábitat de manera precisa, las cuales permiten el desarrollo y existencia de las especies e identificar las condiciones bajo las cuales la especie es capaz de mantenerse (Peterson, *et al.*, 2015).

**Figura 9. Presencia de las especies de interés en Puebla**

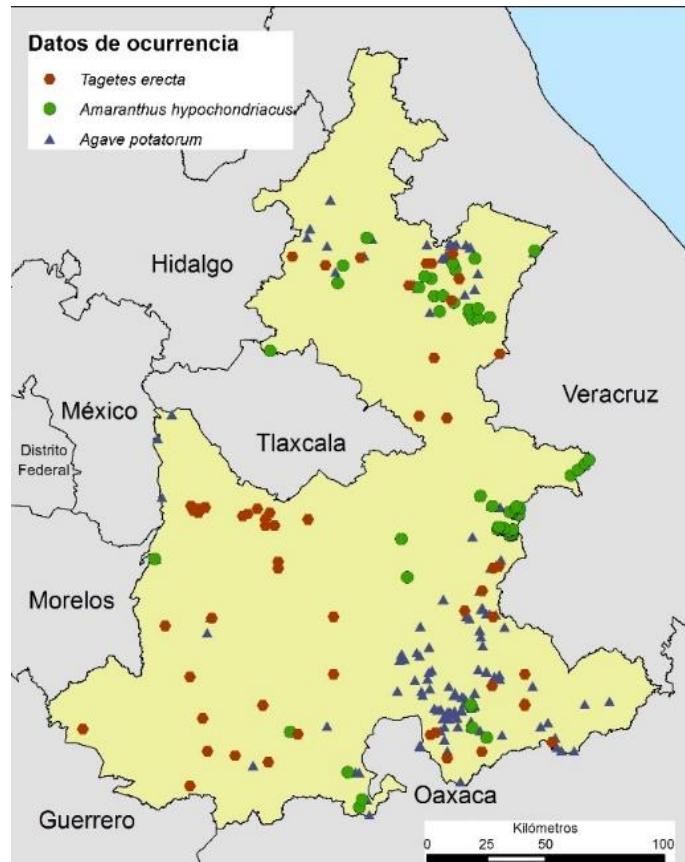


Figura 9. Presencia de las especies de interés dentro de Puebla. Se muestran los registros obtenidos de la tres especies después de la limpieza de datos

## Datos ambientales

Se utilizaron imágenes obtenidas del sensor MODIS terra Vegetation Indices v 006 con una resolución espacial de 250m (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>), utilizando la información que corresponde a Puebla del año 2000 al 2018, a dicha información se le realizó un análisis estadístico multivariante en Idrisi- Terrest que permite un realizar un buen análisis de conjuntos de datos mediante la extracción de características a través de un análisis de componentes principales (PCA) permitiendo la visualización de las distintas variables ambientales mediante 10 ejes, facilitando la condensación y simplicidad de los datos ambientales al momento de generar el modelado (Watanabe, *et al.*, 2018), los cuales fueron obtenidos mediante el procesamiento de imágenes espectrales de NDVI, que refleja el vigor

y la densidad de la vegetación por lo que se observa una estrecha relación con las condiciones climáticas de las regiones y su impacto sobre la vegetación; por tanto al combinar este tipo de información con una adecuada georreferenciación de la ocurrencia de las especies que se trabajaron durante esta investigación se obtuvo la condensación de las variables ambientales (Peng *et al.*, 2019).

## Modelado de Nicho Ecológico (MNE)

### Elección de zonas de calibración y creación de los modelos

Se realizó la división de los datos de ocurrencia de manera latitudinal y otorgarle mayor variabilidad ambiental al modelo; a partir de dicha división se utilizaron el 50 % de los datos de cada especie para la calibración de los modelos y el 50% restante para su posterior evaluación, de tal manera que 81 registros de ocurrencia se utilizaron para para cada procedimiento en el caso de *Agave potatorum*, del mismo modo 29 datos para *Amaranthus hypochondriacus* y 30 y 28 registros respectivamente para *Tagetes erecta* . A los datos trabajados se les generó buffers de 10 km para la calibración de la M de cada especie dentro del modelo.

En se guiada se realizó el proceso de la generación de los modelos de nicho ecológico para cada especie utilizando el software R versión 3. .5. 1, con el cual se corrió la paquetería Kuenm montado sobre el algoritmo MaxEnt, para más detalles consultar Cobos *et al.*, 2019.

Con una  $\beta$  (multiplicador de regularización) de 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 3, 5, 7, 10 y todas las combinaciones disponibles de future classes (F\_C) que brinda MaxEnt teniendo como base: L, Q, P, T y H; generando un total de 29 combinaciones (l, q, p, t, h, lq, lp, lt, lh, qp, qt, qh, pt, ph, th, lqp, lqt, lqh, lpt, lph, qpt, qph, qth, pth, lqpt, lqph, lqth, lpth, lqpth), a cada modelo se le realizaron 10 réplicas.

## Evaluación de modelos

Se continuó con la evaluación de los modelos utilizando el mismo paquete *kuenm*, el cual lleva a cabo las pruebas de:

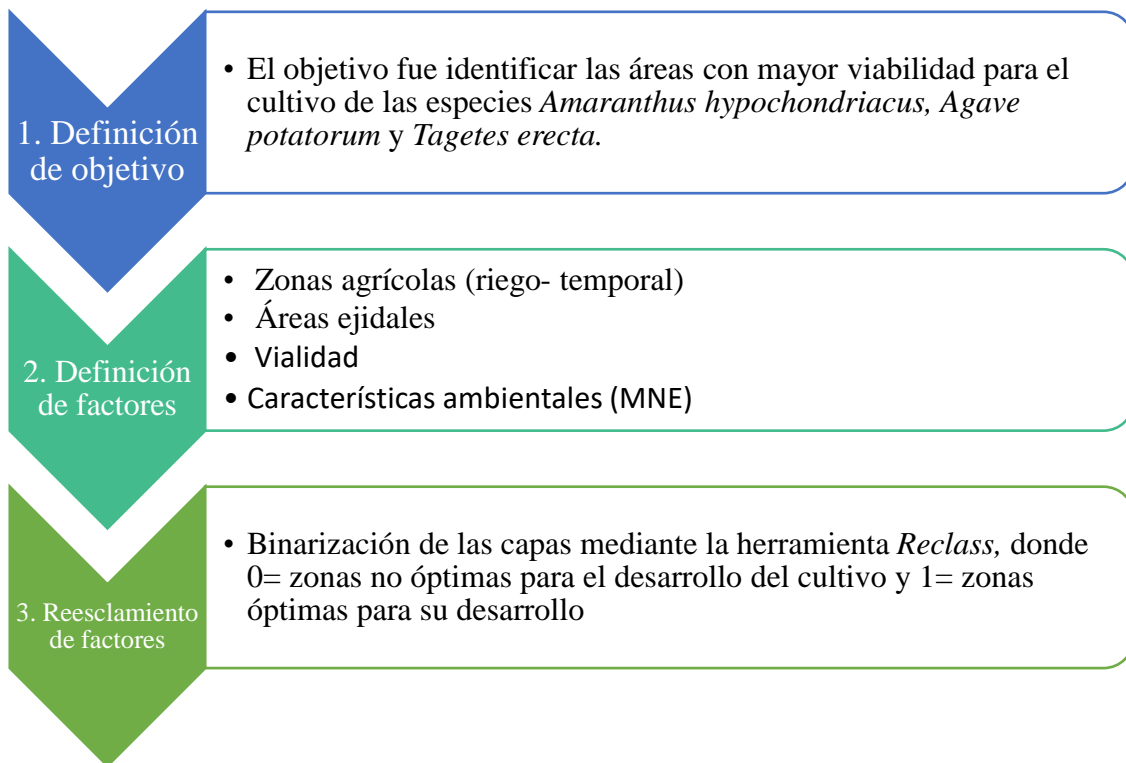
**partial ROC:** Significancia (se comprueba que el modelo generado es mejor que uno al azar).

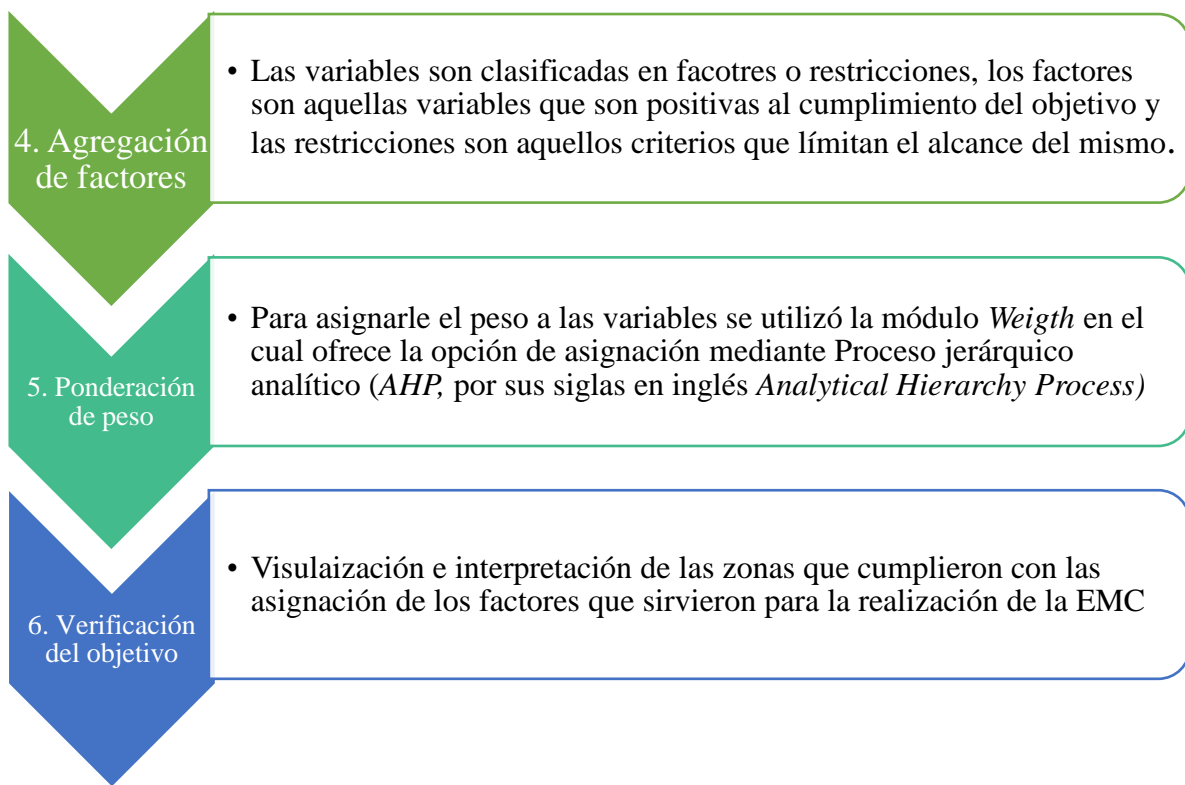
**OR:** Asegura que el tamaño de los datos sean viables para el modelado, se maneja una  $OR < 5\%$ .

**AIC:** Hace comparaciones entre los modelos que pasaron los filtros anteriores y estima cual se acerca más a la realidad, basándose en la calibración que se hizo.

## Evaluación Multicriterio (EMC)

El análisis o evaluación multicriterio se realizó con el software Idrisi- Terrset; la metodología para un análisis de este tipo consta de varios pasos





#### ❖ Definición del objetivo.

El objetivo fue identificar las zonas dentro del estado de Puebla que reunían las características que permitiesen un fácil flujo del producto agrícola obtenido si se decide adoptar los cultivos antes mencionados, esto con la finalidad de brindarle soporte práctico a los resultados de los modelos y hacer más atractiva la investigación al productor.

#### ❖ Definición de criterios

Los criterios a evaluar fueron:

- ❖ Zonas agrícolas ya sea de temporal o que cuenten con sistema de riego
- ❖ Sólo se consideraron áreas ejidales, esto debido a que se busca que tenga un impacto en el grueso de la sociedad agrícola y las áreas ejidales es la información de libre acceso que se encuentra disponible de los espacios que son utilizados para estas actividades por el grueso de este sector

- ❖ Vialidad, se tomó como distancia máxima de 1km a las principales vialidades
- ❖ Áreas donde se encuentran las característica ambientales óptimas para el desarrollo de las especies de interés

#### ❖ Reescalamiento de factores

Para el correcto reescalamiento de los factores se realizó una conversión de las capas obtenidas en el portal de INEGI de archivo .shp que es con el que trabaja ArcMap, en donde se asignó el sistema de coordenadas WGS84 y con SDMtools a .vct de Idrisi- Terrset, donde se realizó el análisis.

Después se hizo una conversión a booleanos dándole el valor de 0 a las áreas que no son de nuestro interés y 1 a aquellas que si lo son con la herramienta *Reclass*.

#### ❖ Agregación de factores

La adición de los factores antes mencionados fue mediante el módulo *SDM* (Spatial Decision Modeler) seguido de la configuración de la herramienta *Fuzzy* a la cual se le configura de modo que realice una función sigmoïdal monotónicamente creciente con puntos de control  $a = 0$ ,  $b = 1$ .

La función sigmoïdal provoca que el cambio en el valor del factor procurando la conveniencia para la realización del objetivo, de manera que al ser monotónicamente creciente los valores mínimos no se consideren convenientes y la posibilidad de adecuación se eleve de 0 a 1 y no disminuya, por lo que los puntos de control marcan la forma de la curva siendo  $a$  cuando la adecuación aumenta y  $b$  cuando se acerque a 1 (López, 2018).

#### ❖ Ponderación de pesos

Consistió en asignar el peso relativo a cada factor según la influencia que tienen para el logro del objetivo, por lo que no todos los factores tienen la misma importancia lo cual también depende de la especie a la que se refiera (Cuadros del 3 al 5)

En el desarrollo de este trabajo la ponderación se realizó mediante el proceso de análisis jerárquico (*AHP*) que compara por pares los factores mediante una matriz, donde el número de filas y columnas es definido por el número de criterios a ponderar, esto permite la comparar la importancia de cada uno de ellos con los demás.

**Cuadro 3. Ponderación de pesos a criterios a evaluar en EMC para *Agave potatorum***

<i>Especie</i>	<b>Factor</b>	<b>Peso</b>
<i>Agave potatorum</i>	Cercanía a vialidades	0.0698
	Zona de temporal	0.0738
	Zona con riego	0.0506
	Áreas ejidales	0.1844
	Condiciones ambientales	0.6213

Fuente: Elaboración propia

Se establecieron los factores con mayor peso aquellas zonas que obtuvimos a través del proceso de modelado de nicho como las áreas que donde se encuentran las condiciones ambientales óptimas para el desarrollo para cada una de las especies de interés y a las áreas ejidales ya que son espacios donde la población que realiza actividades agrícolas en su mayoría no cuenta con la capacidad económica y/o tecnológica motivo por el cual también se favoreció la cercanía a principales vialidades (Gómez, 1995; Ortega Hernández *et al.*, 2010), para *Agave potatorum* se priorizaron aquellas zonas agrícolas sobre las de temporal dado que su estructura está le confiere mayor adaptabilidad a condiciones de escasa humedad (Ledesma, 2014).

**Cuadro 4. Ponderación de pesos a criterios a evaluar en EMC para *Amaranthus hypochondriacus***

<b>Especie</b>	<b>Factor</b>	<b>Peso</b>
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Cercanía a vialidades	0.0830
	Zona de temporal	0.2024
	Zona con riego	0.0237
	Áreas ejidales	0.2235
	Condiciones ambientales	0.4674

Fuente: Elaboración propia

Al referirnos al *Amaranthus hypochondriacus* se consideró con mayor relevancia las zonas donde se realiza agricultura de temporal ya que es un cultivo poco exigente a las condiciones de humedad y generalmente su cultivo es realizado en áreas donde la disponibilidad de agua depende las precipitaciones temporales propias de cada región (Garay *et al.*, 2014).

**Cuadro 5. Ponderación de pesos a criterios a evaluar en EMC para *Tagetes erecta***

<b>Especie</b>	<b>Factor</b>	<b>Peso</b>
<b><i>Tagetes erecta</i></b>	Cercanía a vialidades	0.0885
	Zona de temporal	0.0490
	Zona con riego	0.1544
	Áreas ejidales	0.1993
	Condiciones ambientales	0.5088

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo al tratarse de *Tagetes erecta* se procuraron aquellas regiones que cuenten con sistema de riego dado que de este cultivo la parte que se comercializa es la flor requiere una apropiada disponibilidad de agua para una buena calidad de floración (Gómez, 2014).

## Resultados

Para cada una de las especies se generaron 261 modelos candidatos, de los cuales fueron estadísticamente significativos 1 para *Agave potatorum*, 4 para *Amaranthus hypochondriacus*, 11 para *Tagetes erecta*. Todos con tasas de omisión (OR) de 0% al mismo tiempo todos fueron significativamente distintos a un modelo aleatorio (PROC) con un valor de  $P = 0.00$

**Cuadro 4. Modelos que pasaron las pruebas de significancia y complejidad**

Especie	Modelo	PROC	OR al 5%	AICc	
					$\beta$
<i>Agave potatorum</i>	7	t	0	0	4571.86086
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	3	lq	0	0	1581.882
	3	lqt	0	0	1581.883
	5	qp	0	0	1583.232
	5	qpt	0	0	1583.232
<i>Tagetes erecta</i>	10	lq	0	0	1640.92849
	10	lqt	0	0	1640.92849
	10	lqh	0	0	1640.92849
	10	lqth	0	0	1640.92849
	10	l	0	0	1641.21837
	10	lt	0	0	1641.21837
	10	lh	0	0	1641.21837
	5	lph	0	0	1641.75061
	5	lpth	0	0	1641.75061
	5	lp	0	0	1641.75061
	5	lpt	0	0	1641.75061

Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar las áreas dentro de Puebla que presentan características que les brindan idoneidad ambiental para cada una de las especies trabajadas. En el caso de *Agave potatorum* (Figura 10) hay una disponibilidad intermedia de las condiciones medio ambientales en prácticamente todo el estado exceptuando algunos manchones en ciertos municipios pertenecientes a las regiones nortes del estado y al Valle de Serdán las cuales tienen características que dificultarían el desarrollo esperado considerando algún tipo de manejo agroecológico en las unidades productivas presentes en esas zonas, sin embargo se nota claramente que dicha disponibilidad es idónea en gran parte de la región de Tehuacán – Sierra Negra y con sectores a todo lo ancho del área central del estado, es importante mencionar que a pesar que en la zona norte del estado es donde hay mayor restricción ambiental para *Agave potatorum* también hay regiones que tienen una alta disponibilidad de factores ambientales que pueden facilitar el crecimiento de esta especie.

**Figura 10. Adecuabilidad ambiental del *Agave potatorum* en Puebla**

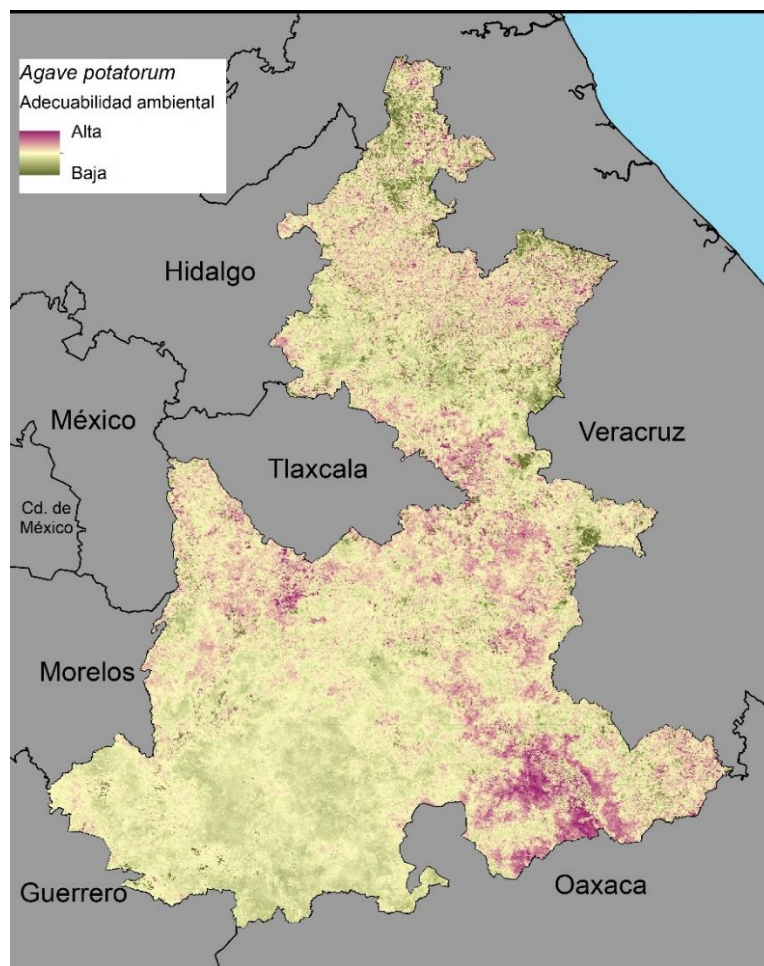


Figura 10. Idoneidad ambiental del *Agave potatorum*.

Si hablamos de *Amaranthus hypochondriacus* (Figura 11) vemos que tiene una alta adecuabilidad ambiental en aquellas zonas que tienen climas cálidos húmedos a sub húmedos principalmente por lo que se encontró mayor afinidad en la mayor parte de las regiones que comprenden la Sierra Norte y la Sierra Nororiental y a altas altitudes por lo que también tienen características que permiten la adecuabilidad ambiental del *Amaranthus hypochondriacus* la zona perteneciente a la Sierra Negra y el área de los volcanes

**Figura 11. Adecuabilidad ambiental del *Amaranthus hypochondriacus* en Puebla**

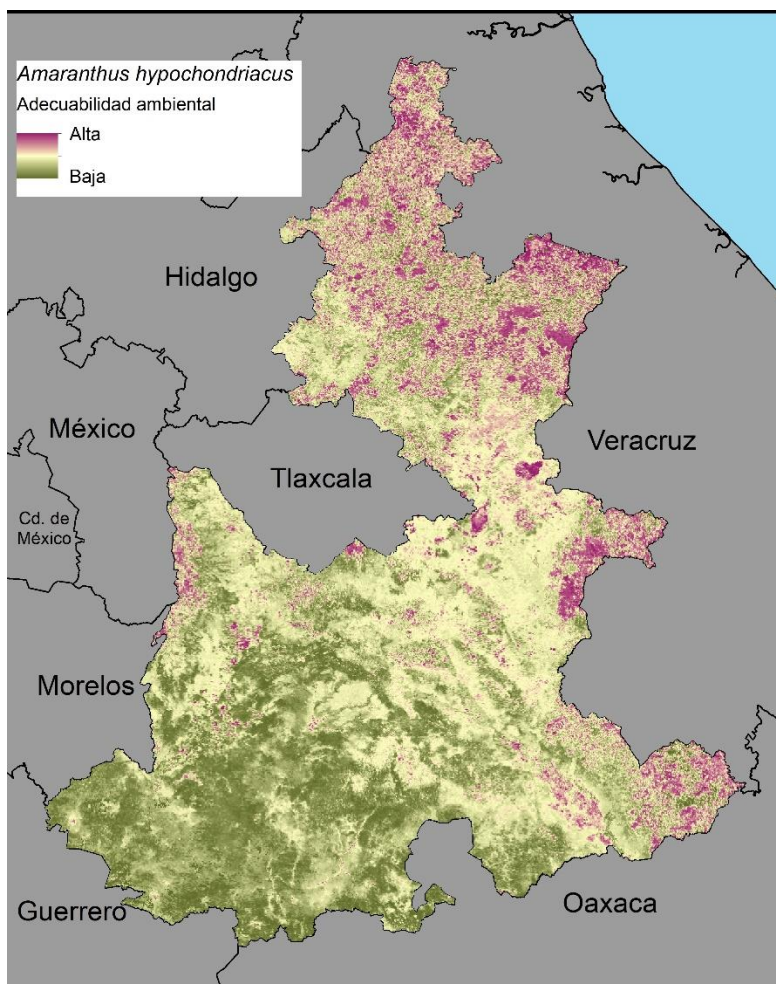


Figura 11. Adecuabilidad ambiental del *Amaranthus hypochondriacus*.

Al enfocarse en *Tagetes erecta* se observa con claridad una buena afinidad ambiental en general en gran parte del estado, sin embargo esta alta plasticidad ambiental que se muestra la especie (Figura 12) se atribuye a la escasa cantidad de puntos de ocurrencia por lo que el modelo no pudo diferenciar con mayor claridad la especificidad ambiental de la especie; sin

embargo, a pesar del factor antes mencionado se observa mayor compatibilidad hacia las regiones Norte y Nororiental del estado y parte de la región del Valle de Serdán de igual manera al Valle de Atlixco y Matamoros

**Figura 12. Adecuabilidad ambiental de *Tagetes erecta* en Puebla**

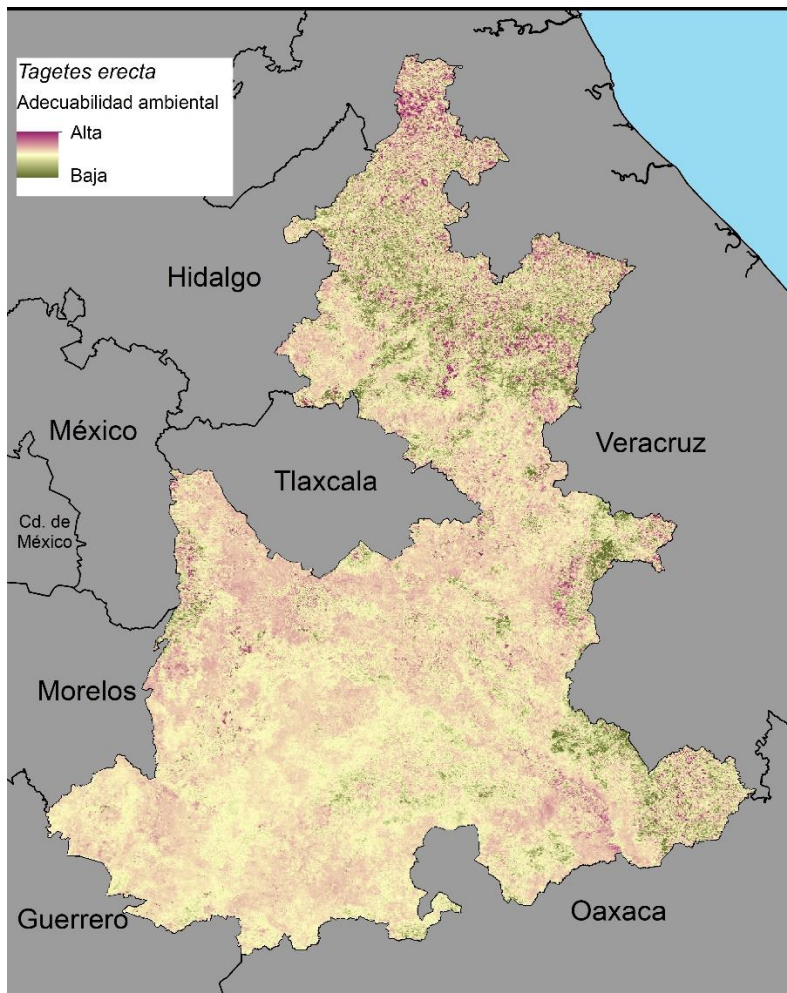


Figura 12. Adecuabilidad ambiental de *Tagetes erecta*.

Es evidente que las especies que se eligieron muestran una alta adaptabilidad a las condiciones climáticas de Puebla, sin embargo, para que sean cultivos factibles para su implementación se consideraron las características socio-estructurales para al mismo tiempo tener un mayor impacto de los resultados obtenidos. Por eso al realizar la evaluación multicriterio de estas características se obtuvo el siguiente mapeo para *Agave potatorum* (Figura 13), *Amaranthus hypochondriacus* (Figura 14) y para *Tagetes erecta* (Figura 15).

**Figura 13. Viabilidad agroestructural para *Agave potatorum* en Puebla**

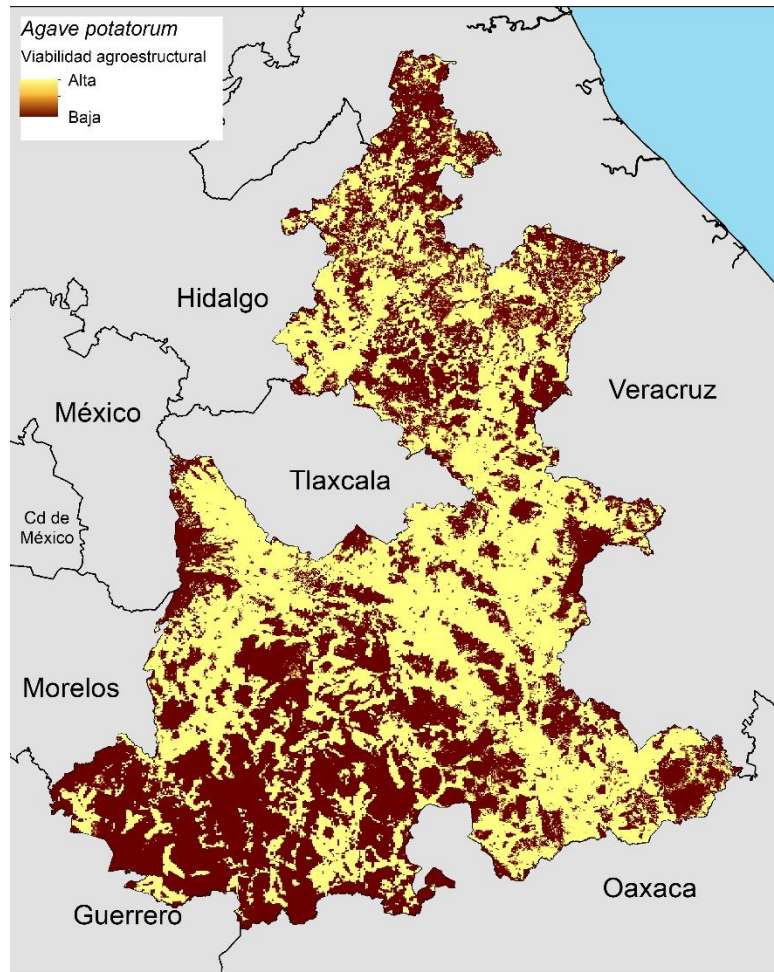


Figura 13. Viabilidad agroestructural para *Agave potatorum* en Puebla. Se muestran las regiones de coincidencia de los factores que posibilitan la viabilidad de la implementación de *Agave potatorum* en el estado

**Figura 14. Viabilidad agroestructural para *Amaranthus hypochondriacus* en Puebla**

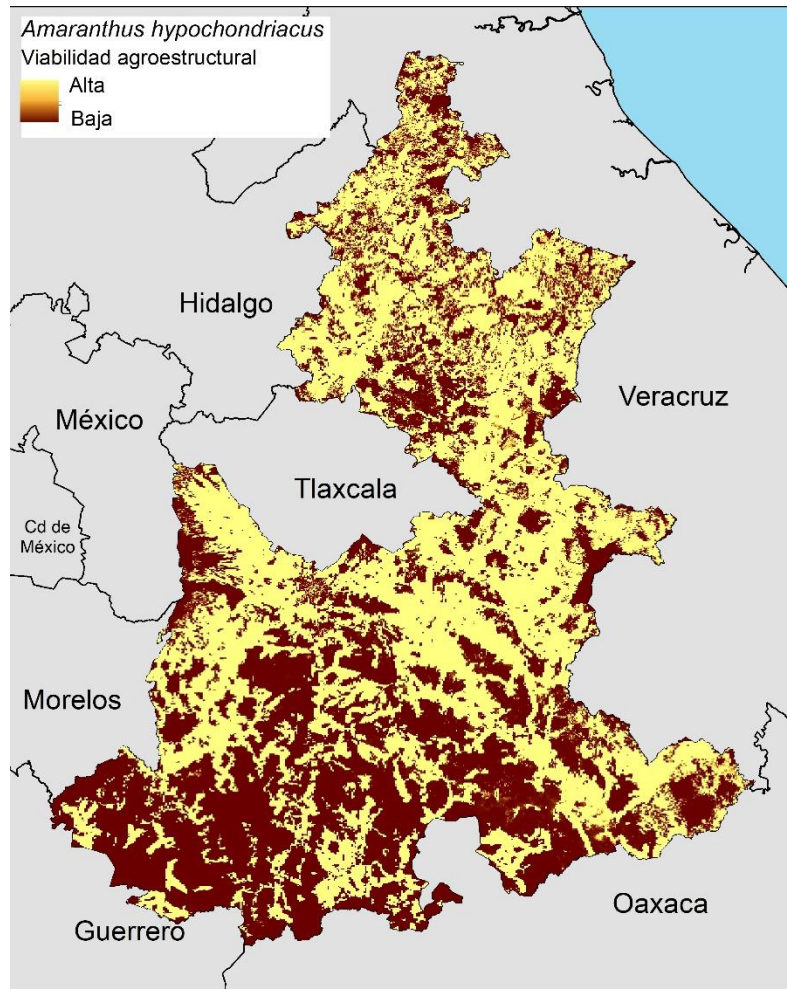


Figura 14. Viabilidad agroestructural para *Amaranthus hypochondriacus* en Puebla. Se muestran las regiones de coincidencia de los factores que posibilitan la viabilidad del cultivo de *Amaranthus hypochondriacus*

**Figura 15. Viabilidad agroestructural para *Tagetes erecta* en Puebla**

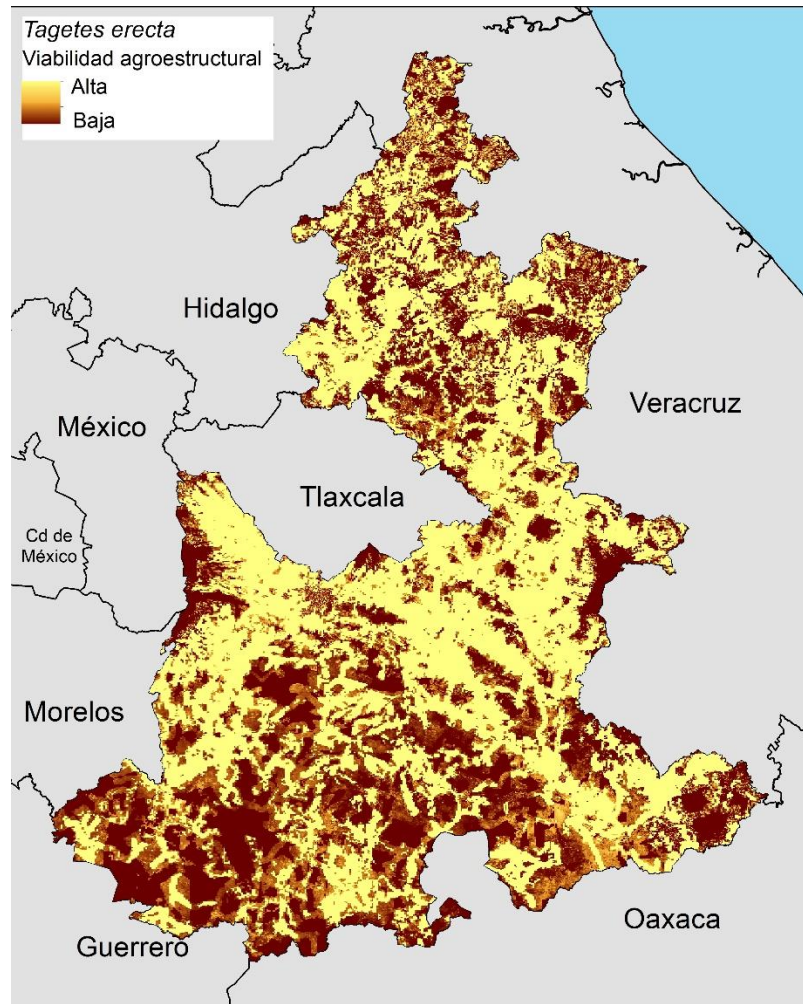


Figura 15. Viabilidad agroestructural para *Tagetes erecta* en Puebla. Se muestran las regiones de coincidencia de los factores que posibilitan la viabilidad de la implementación de *Tagetes erecta*

## Discusión

Debido a los modelos de nicho ecológicos obtenidos se puede teorizar que las especies con las que se trabajó pueden desarrollarse como cultivos dentro del estado con el mínimo de insumos agroquímicos en las parcelas, esto buscando la disminución del impacto negativo que tienen las prácticas antropogénicas en los sitios agrícolas y sus alrededores bajo las pautas que marca (Best et al., 2008; Reynolds, 2014). Es bien sabido que las características climáticas juegan un papel fundamental para la subsistencia de especies agrícolas más no es el único factor que considera el agricultor al momento de implementar un cultivo, otro factor determinante es la infraestructura con la que cuenta y/o rodea a los sitios parcelarios, por lo que fueron considerados que las zonas agrícolas tuvieran proximidad con las principales vialidades esto con la finalidad de agilizar la movilización de los productos agrícolas así como el impacto que tienen estos en el mercado como lo menciona Mitchell *et al.*, 2018 al describir el impacto ambiental que tienen este tipo de actividades y Santacolma, 2015 junto con Rubio, 2006 al hablar de la problemática agraria en las comunidades rurales.

En este proyecto se buscó darle complejidad al factor ambiental dado que se trabajó de manera indirecta con las características ambientales que han permitido el desarrollo óptimo de las tres especies. Algo importante a sopesar en este punto es el intervalo utilizado para la extracción de dicha información ya que consideraron imágenes MODIS del año a partir del año 2000 al 2018 ya que a partir de ese año el sensor comenzó a orbitar la Tierra según lo descrito por Klein *et al.* en 2002 y los datos de registro de las especies fueron considerados a partir de la década de los 70's ya que se necesitaba una robustez en la información que le permitió la obtención de la información ambiental con la que se realizaron los modelos de nicho ecológico.

Las especies con las que se trabajó se procuró que tuvieran potencial de mercado, abarcando así el aspecto económico- social que es posiblemente el que mayor importancia tiene en las sociedades rurales ya que las actividades agrícolas son una fuerte importante de ingreso en estas comunidades, la cual está siendo desplazada dada la migración del grueso poblacional dejando inactivos los espacios agrícolas, de igual manera que lo reportan Aceves, 2000 y de Grammont, 2009. Provocando un desbalance en las actividades sociales propias de las comunidades al tiempo que le brinda una entrada más a los productos de importación que

entre otras cosas compiten con los productos nacionales de manera deshonesto y que forman parte de un conjunto de rasgos fomentan el desarraigo de la población hacia sus comunidades de origen, como lo señala Ramírez, 2013.

Otro punto que se trató al análisis de viabilidad de las especies como cultivo fue la cercanía de las unidades parcelarias ejidales a las principales vialidades tratando de disminuir los costos monetarios de traslado de las cosechas al igual que el gasto que los productores invierten en el de manejo de sus espacios agrícolas con los insumos agroindustriales dado que sigue siendo un factor limitante como lo ha señalado Ramírez, 2013

A pesar de la importancia que tienen los aspectos sociales, culturales y económicos creo que es necesaria una investigación más profunda en estos aspectos dado que en el presente trabajo se priorizó el factor ambiental dado que se utilizó como eje principal el modelo de nicho ecológico para localizar las zonas que tuvieran los factores agroestructurales mencionados con anterioridad y así ubicar las áreas viables para una posible implementación de las especies trabajadas como cultivo rentable.

Hay una amplia descripción de las características de los agaves que les permiten la subsistencia en climas áridos e incluso sabiendo que hay una alta población en zonas áridas y semiáridas (García, 2007; Torres, et al., 2009; Ledesma, 2014) el modelo de nicho presenta zonas de adecuabilidad ambiental óptima para el *Agave potatorum* en regiones con climas cálidos, templados.

Para *Amaranthus hypochondriacus* aunque se ha descrito para climas cálidos (Ayala, et al., 2016; Espitia, et al., 2010) se observa una mayor adecuabilidad a climas cálido - húmedos (región Norte) que a climas cálidos - sub húmedos (región mixteca); esta especialización climática que se hace evidente creo está relacionada a los nutrientes disponibles del suelo.

En el caso de *Tagetes erecta* se ha descrito que de manera natural crece en valles altos (Serrato, et al., 1998), sin embargo, el modelo de nicho mostró que la especie puede tener una óptima adecuabilidad en la región del Valle de Serdán.

Se puede apreciar que en las especies que se eligieron para este proyecto *Agave potatorum* (Figura 10), *Amaranthus hypochondriacus* (Figura 11) y *Tagetes erecta* (Figura 12) tienen una buena plasticidad ambiental a las condiciones que todo el estado por lo que la viabilidad de la implementación como cultivo rentable depende de la infraestructura vial que rodea a

las zonas agrícolas ejidales dentro del estado por lo cual la coloración café claro que se muestra en los mapas que representan la viabilidad agroestructural de las especies la cual está relacionada con las condiciones ambientales óptimas para cada una de ellas.

Un factor importante de la buena plasticidad climática de las especies elegidas dentro del estado puede ser que para el caso de *Agave potatorum* y *Amaranthus hypochondriacus* el estado de Puebla es considerado como centro de origen y/o domesticación; factor que puede valorarse al ver los resultados obtenidos para *Tagetes erecta* ya que solo hay registro de México como país como centro de origen de esta especie.

A pesar de que en los mapas que se generaron para conocer la distribución potencial de las especies hay zonas vacías esto no significa que en aquellos lugares es imposible que se dé el cultivo de las mismas sin embargo es posible que las especies puedan desarrollarse en estos sitios pero muy probablemente esto implicaría un mayor costo en el mantenimiento y producción o bien puede haber una baja en la calidad de los productos obtenidos.

Es importante ampliar el panorama de trabajo al tratarse de recursos naturales ya que es relevante la consideración de los mismos, en este caso especies agrícolas, desde una perspectiva espacio- temporal como refiere Soberón *et al.*, 2017 ya que para predicciones de distribución potencial es importante conocer todas las características ambientales que hacen posible la existencia de estas especies en las áreas en las que se encuentran en lo cual se coincidió con Varela *et al.*, 2014; por lo que es importante un manejo riguroso de los datos y una buena gestión de la información aún más al trabajar con plataformas digitales y todas las tecnologías emergentes (información obtenida de manera remota mediante sensores) que van enriqueciendo a lo que se conoce como agricultura de precisión de acuerdo a lo señalado por Bajwa *et al.*, 2015 y Cuervo *et al.*, 2017; otro aspecto que es importante mencionar es el cambio en el enfoque que se le da al uso de estas innovaciones tecnológicas y a la información generada por las mismas dado que puede ser importante siempre teniendo en cuenta la correcta elección y manipulación de la información que genere Marote, 2010.

Por lo que la implementación de los recursos obtenidos a través de sensores remotos son una herramienta importante ya que nos brindan la posibilidad de conocer las características que requiere una población basándonos en su historia ambiental como sugieren Silva *et al.*, 2018 y Nakano *et al.*, 2013 y poder realizar de manera acertada sugerencias para una mejora en las prácticas de manejo agrícola con la finalidad de preservar los recursos genéticos de las

poblaciones agrícolas al tiempo que se mejora la situación económicas de los agricultores y se trabaja un sentimiento de arraigo en las comunidades agrícolas y urbanas como refiere (Becerra *et al.*, 2016).

## Conclusiones

El presente trabajo muestra que se pueden utilizar las tecnologías emergentes para el desarrollo y protección de los ambientes naturales con los que contamos de los cuales hacemos uso para la subsistencia del ser humano mediante prácticas agrícolas, aún hay mucho por hacer con los recursos biológicos nativos ya que presentan una gran adaptabilidad al entorno ecológico actual; las especies con las que se trabajó durante esta investigación muestran una gran plasticidad a los diferentes climas con los que cuenta el estado de Puebla, porque a pesar de esta diversidad, se pueden cultivar prácticamente en cualquier región del estado.

Como se ha documentado a través de esta redacción, las tecnologías que conforman la agricultura de precisión, tal como lo es el MNE ha tenido resultados beneficiosos para los agricultores y los entornos que están alrededor de las unidades de producción; el impacto no es solo benéfico para el medio ambiente con la reducción de insumos externos a los sitios agrícolas, sino también económicos dado que al haber menos gasto en el mantenimiento de las parcelas junto con el uso de especies adecuadas para la topografía y las características que ésta representa, por lo que hay una mayor ganancia económica por lo que se espera que la aplicación de la información obtenida en esta investigación generará un impulso económico al estado y puede servir como herramienta para el rescate del patrimonio biocultural, tanto estatal como nacional, pudiendo servir para reforzar el sentimiento de arraigo en las poblaciones jóvenes de los ambientes rurales principalmente y que el abandono de sus comunidades de origen sea una opción y no su única salida.

Además de las aportaciones señaladas de esta investigación, creo relevante la mención del uso de imágenes satelitales de alta resolución así como la consideración temporal de la distribución de las especies de interés para la obtención de una certera distribución potencial de las mismas, dado que desde mi punto de vista se trabaja de manera integral con la mayoría de los factores espacio – temporales que afectan la distribución potencial de las especies y dependiendo del objetivo del proyecto se puede trabajar a distintas escalas de precisión.

Veo una necesidad de realizar un mayor número de estudios sobre cultivos nativos ya que además de rescatar el patrimonio biocultural que distingue a una población, la perduración de los mismos hace menos invasivas las prácticas agrícolas al entorno.

## Referencias bibliográficas

- Aceves Ávila, R. (2000). El campo que nos tienen prometido... Notas para una nueva agenda para la organización económica del medio rural. *Estudios Agrarios*, 15.
- Aguilar-Rivera, N. (2015). EVALUACIÓN EMERGY Y LCA EN LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA DE VERACRUZ, MÉXICO. 36(4), 14.
- Aguilar-Rivera, N., Algara Siller, M., & Olvera Vargas, L. A. (2015). Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México. *Revista de geografía Norte Grande*, 60, 135-152. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000100008>
- Aguirre-Dugua, X., & Eguiarte, L. E. (2013). Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild Agave cupreata and Agave potatorum extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments*, 90, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.018>
- Alemán, B. C. (1968). FLORES MEXICANAS/MEXICAN FLOWERS. *Artes de México*, 104, 25-50.
- Arce-Romero, A. R., Monterroso-Rivas, A. I., Universidad Autónoma Chapingo, Gómez-Díaz, J. D., & Universidad Autónoma Chapingo. (2017). Mexican plums (*Spondias* spp.): Their current distribution and potential distribution under climate change scenarios for Mexico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XXIII(1), 5-19. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.06.020>
- Arias Toledo, A. A., Valverde Valdés, Maria Teresa, & Reyes Santiago, Jerónimo. (2000). *Las plantas de la región de Zapotitlán Salinas, Puebla*. (1a ed.). Instituto Nacional de Ecología.
- Ayala-Garay, A. V., Espitia-Rangel, E., Rivas-Valencia, P., Martínez-Trejo, G., & Almaguer-Vargas, G. (2016). Análisis de la cadena del valor de amaranto en México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 13(1), 87. <https://doi.org/10.22231/asyd.v13i1.280>
- Bajwa, A. A., Mahajan, G., & Chauhan, B. S. (2015). Nonconventional Weed Management Strategies for Modern Agriculture. *Weed Science*, 63(4), 723-747. <https://doi.org/10.1614/WS-D-15-00064.1>

- Barajas Pérez Juan Saúl, Montes Belmont, Roberto, Castrejón Ayala Federico, Flores Moctezuma Hilda Elizabeth, & Serrato Cruz Miguel Angel. (2011). *Propiedades antifúngicas en especies del género Tagetes*. 34, 85-91.
- Becerra López Jorge Luis, Romero Méndez Ulises, Ramírez Bautista Aurelio, & Becerra López Jesús Salvador. (2016). Revisión de las técnicas para el modelado de la distribución de las especies. *Revista Biológico Agropecuaria*.  
[https://www.researchgate.net/profile/Ulises\\_Romero/publication/314313646\\_Revisión\\_de\\_las\\_técnicas\\_para\\_el\\_modelado\\_de\\_la\\_distribución\\_de\\_las\\_especies\\_Review\\_of\\_techniques\\_for\\_modeling\\_species\\_distribution/links/58c04a0f92851cbfd30bc20f/Revision-de-las-tecnicas-para-el-modelado-de-la-distribucion-de-las-especies-Review-of-techniques-for-modeling-species-distribution.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ulises_Romero/publication/314313646_Revisión_de_las_técnicas_para_el_modelado_de_la_distribución_de_las_especies_Review_of_techniques_for_modeling_species_distribution/links/58c04a0f92851cbfd30bc20f/Revision-de-las-tecnicas-para-el-modelado-de-la-distribucion-de-las-especies-Review-of-techniques-for-modeling-species-distribution.pdf)
- Bellón, B., Bégué, A., Lo Seen, D., de Almeida, C., & Simões, M. (2017). A Remote Sensing Approach for Regional-Scale Mapping of Agricultural Land-Use Systems Based on NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 9(6), 600. <https://doi.org/10.3390/rs9060600>
- Beltrán-Rodríguez, L. A., & Martínez-Rivera, B. (2012). *ETNOECOLOGÍA DE LA FLOR DE CATARINA - Laelia autumnalis (La Llave & Lex.) Lindl.)—(ORCHIDACEAE) EN*. 17.
- Best, S., Zamora, I., Quiroz, I., & García, M. J. (2008). *Tecnologías aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de tecnología de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos* (Primera). I+D+I Plataforma Silvoagropecuaria.
- Biological Collection Access Service*. (2018). <http://www.biocase.org/>
- Bongiovanni, R., & Mantovani, E. C. (2006). *AGRICULTURA DE PRECISIÓN: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. 244.
- Bramley, R. G. V. (2009). Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop and Pasture Science*, 60(3), 197. <https://doi.org/10.1071/CP08304>

- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., & Gattelli, M. (2015). Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026-4047. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>
- Castro Díaz Alfredo Salvador. (2013). El Agave y sus productos. *emas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 2(7), 53-61.
- Castro Ramírez, Adraina Elena. (1994). Origen, naturaleza y usos del cempoalxóchit. *Revista de Geografía Agrícola*, 20, 179-189.
- Cobos, M. E., Osorio-Olvera, L., & Peterson, A. T. (2019). *Assessment and representation of variability in ecological niche model predictions* [Preprint]. Bioinformatics. <https://doi.org/10.1101/603100>
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Colín, H., & Cuevas, A. H. (2012). *EL MANEJO TRADICIONAL Y AGROECOLÓGICO EN UN HUERTO FAMILIAR DE MÉXICO, COMO EJEMPLO DE SOSTENIBILIDAD*. 17.
- Collette, L. K. D., & Pither, J. (2015). Russian-olive (*Elaeagnus angustifolia*) Biology and Ecology and its Potential to Invade Northern North American Riparian Ecosystems. *Invasive Plant Science and Management*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.1614/IPSM-D-14-00037.1>
- Colunga-GarcíaMarín, P., & Zizumbo-Villarreal, D. (2007). *Tradiciones en el aprovechamiento de los agaves mexicanos: Una aportación a la protección legal y conservación de su diversidad biológica y cultural*. 20.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2018). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- Cuervo-Robayo, A. P., Escobar, L. E., Osorio-Olvera, L. A., Varela, S., Martínez-Meyer, E., Velásquez-Tibatá, J., Munguía, M., Castañeda-Álvarez, N. P., Lira, A., Soley-Guardia, M., Serra-Díaz, J. M., & Townsend, A. (2017). INTRODUCCION A LOS ANÁLISIS ESPACIALES CON ÉNFASIS EN MODELOS DE NICHO ECOLÓGICO. *Biodiversity Informatics*, 13.
- de Grammont, H. C. (2009). La desagrarización del campo mexicano. *Revista de Ciencias Sociales*, 43.
- De la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Miranda, C., & Díaz, G. (2017). La cobertura del cultivo como indicador de la productividad de maíz en un lote con siembra variable. *AgriScientia*, 34(1), 1. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v34.n1.17354>
- Delgado-Lemus, A., Casas, A., & Téllez, O. (2014). Distribution, abundance and traditional management of *Agave potatorum* in the Tehuacán Valley, Mexico: Bases for sustainable use of non-timber forest products. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(1), 63. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-63>
- Díaz Cerón Benajmín. (2014). *TRANSFORMACIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DEL AMARANTO EN SAN MIGUEL TECUANIPA, PUEBLA* [BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA]. <http://www.eco.buap.mx/aportes/tesis/me/2014/diazbenjamin.pdf>
- Drobne, S., & Lisec, A. (2009). *Multi-attribute Decision Analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging*. 16.
- Earthdata Search*. (s. f.). Recuperado 24 de noviembre de 2018, de <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- Eastman, J. R. (2016). *IDRISI TerrSet. Geoespacial Monitoring and Modeling System. Terrset-Manual.pdf*. CLARCK LABS. <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>
- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., J. Hijmans, R., Huettmann, F., R. Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J., G. Lohmann, L., A. Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C.,

Nakamura, M., Nakazawa, Y., McC. M. Overton, J., Townsend Peterson, A., ... E. Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151. <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>

Espitia-Rangel, E., Escobedo-López, D., Mapes-Sánchez, C., de la O-Olán, M., Aguilar-Delgado, M., Hernández-Casillas, J. M., Ayala-Garay, A. V., Rivas-Valencia, P., Martínez-Trejo, G., & Ramírez-Vázquez, M. L. (2012). Conservación de los recursos genéticos de amaranto (*Amaranthus* spp.) en México. En *Amaranto: Ciencia y Tecnología* (pp. 147-163). INIFAP/SINAREFI Mexico.

Espitia-Rangel, E., Mapes-Sánchez, E. C., & Núñez-Colín, C. A. (2010). *DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESPECIES CULTIVADAS DE AMARANTHUS Y DE SUS PARIENTES SILVESTRES EN MÉXICO*. 11.

Flores-Medina, M., Flores-García, F., Velasco-Martínez, V., González-Cervantes, G., & Jurado-Zamarripa, F. (2015). Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 14.

Fortin, M.-J., & Dale, M. R. T. (2014). *SPATIAL ANALYSIS A Guide for Ecologists*. Cambridge University Press, 12.

G. Navarro, Adolfo, Townsend Peterson, Andrew, Nakazawa J. Yoshinori, & Liebig-Fossas, Iván. (2003). *COLECCIONES BIOLÓGICAS, MODELAJE DE NICHOS ECOLÓGICOS Y LOS ESTUDIOS DE LA BIODIVERSIDAD*. Una perspectiva Latinoamericana de la Biogeografía. [https://www.researchgate.net/profile/Andrew\\_Peterson10/publication/230709870\\_Colecciones\\_biologicas\\_modelaje\\_de\\_nichos\\_ecologicos\\_y\\_los\\_estudios\\_de\\_la\\_biodiversidad/links/589bdfc192851c942ddaf62c/Colecciones-biologicas-modelaje-de-nichos-ecologicos-y-los-estudios-de-la-biodiversidad.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andrew_Peterson10/publication/230709870_Colecciones_biologicas_modelaje_de_nichos_ecologicos_y_los_estudios_de_la_biodiversidad/links/589bdfc192851c942ddaf62c/Colecciones-biologicas-modelaje-de-nichos-ecologicos-y-los-estudios-de-la-biodiversidad.pdf)

- Gaitán, Juan José, Donadlo Bran Eduardo D, & Azcona C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: Ventajas y limitaciones. *AgriScientia*, 32(2), 83-93.
- Garay, A. V. A., Valencia, P. R., Cortes-Espinoza, L., de la Olán, M., Escobedo-López, D., & Rangel, E. E. (2014). La rentabilidad del cultivo de amaranto (*Amaranthus* spp.) en la región centro de México. *Ciencia ergo-sum*, 21(1), 47-54.
- García Mendoza, Abisaí J. (2007). Los agaves de México. *Ciencias*, 87, 14-23.
- Global Biodiversity Information Facility. (2018). <https://www.gbif.org/occurrence/search>
- Gómez Gómez, Alma Alicia, & Carrillo Ángeles, Rebeca Yurani. (2014). *Producción y comercialización de flores mexicanas* (Digital). ECORFAN - Spain. [https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO\\_FLORES.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_FLORES.pdf)
- Gómez, M. I., Barragán, A., Magnitskiy, S., & Rodríguez, L. E. (2019). Normalized difference vegetation index, and K<sup>+</sup> in stem sap of potato plants (Group Andigenum) as affected by fertilization. *Experimental Agriculture*, 1-11. <https://doi.org/10.1017/S001447971900005X>
- Gómez-Oliver, L. (1995). *El papel de la agricultura en el desarrollo de México* (HC131 G63; p. 52).
- Gumma, M. K., Thenkabail, P. S., Deevi, K. C., Mohammed, I. A., Teluguntla, P., Oliphant, A., Xiong, J., Aye, T., & Whitbread, A. M. (2018). Mapping cropland fallow areas in myanmar to scale up sustainable intensification of pulse crops in the farming system. *GIScience & Remote Sensing*, 55(6), 926-949. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1482855>
- Herrero, I. Q., López, Y. R., & Alfonso, P. M. H. (2006). *La aplicación de la Agricultura de Precisión: Su impacto social*. 15(3), 4.
- Hilker, T., Wulder, M. A., Coops, N. C., Linke, J., McDermid, G., Masek, J. G., Gao, F., & White, J. C. (2009). A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 113(8), 1613-1627. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.007>

Ibarra-Montoya, J. L., Rangel-Peraza, G., González-Farías, F. A., Anda, J. D., Martínez-Meyer, E., & Macías-Cuellar, H. (2012). Uso del modelado de nicho ecológico como una herramienta para predecir la distribución potencial de *Microcystis* sp (cianobacteria) en la Presa Hidroeléctrica de Aguamilpa, Nayarit, México. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 7(1), 218-234. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.607>

INAFED. (2017). *Medio Físico—Puebla*. <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM21puebla/mediofisico.html>

INEGI. (2014). <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/ntm/>

INEGI. (2017). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2016/agricola2016\\_0.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2016/agricola2016_0.pdf)

José-Silva, L., dos Santos, R. C., de Lima, B. M., Lima, M., de Oliveira-Júnior, J. F., Teodoro, P. E., Eisenlohr, P. V., & da Silva Junior, C. A. (2018). Improving the validation of ecological niche models with remote sensing analysis. *Ecological Modelling*, 380, 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.04.013>

Klein, A. G., & Stroeve, J. (2002). Development and validation of a snow albedo algorithm for the MODIS instrument. *Annals of Glaciology*, 34, 45-52. <https://doi.org/10.3189/172756402781817662>

Ledesma Horta Julio César. (2014). *Distribución del Agave Mezcalero (Agave ssp.) y Áreas con Aptitud Potencial para su Desarrollo en San Felipe, Guanajuato* [Text, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARÍA ANTONIO NARRO]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6492/62907%20LEDESMA%20HORTA%2c%20JULIO%20CESAR%20%20TESIS%202.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Liang, L., Wenpeng, D., Huimin, Y., Lin, Z., & Yu, D. (2017). Spatio-Temporal Patterns of Vegetation Change in Kazakhstan from 1982 to 2015. *Journal of Resources and Ecology*, 8(4), 378-384. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2017.04.009>
- Linné, Carl von, & Salvius, Lars. (1753). *Caroli Linnaei ... Species plantarum :exhibentes plantas rite cognitatas, ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas...* (Vol. 2). Holmiae :Impensis Laurentii Salvii,. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/13830>
- López Cruz Juana Yolanda, Martínez Gutiérrez Gabino Alberto, & Caballero García Abelardo. (2016). DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN DEL AGAVE - MEZCAL Y OPCIONES DE DESARROLLO LOCAL EN COMUNIDADES INDÍGENAS DE OAXACA. 21 ° *Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México.*, 1-20.
- López Valle, S. (2018). *Estrategias para la protección de manantiales: Propuesta metodológica de acuerdo al entorno físico- social y proyección de escenarios.* Universidad Autónoma del Estado de México.
- Macías García, C. (2019). *Los agaves y el campo mexicano.* Instituto Nacional de Ecología.
- Martínez Peña, M., Cortés Cuevas, A., & Avila González, E. (2004). Evaluación de tres niveles de pigmento de flor de cempasúchil (*Tagetes erecta*) sobre la pigmentación de la piel en pollos de engorda. *Técnica Pecuaria en México*, 42(1). <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=61342109>
- Martínez Salvador, L., & Martínez Salvador, L. (2016). Seguridad alimentaria, autosuficiencia y disponibilidad del amaranto en México. *Problemas del desarrollo*, 47(186), 107-132.
- Matías L Marote. (2010). *Agricultura de Precisión*. 10, 143-166.
- Mitchell, S., Weersink, A., & Erickson, B. (2018). Adoption of precision agriculture technologies in Ontario crop production. *Canadian Journal of Plant Science*, 98(6), 1384-1388. <https://doi.org/10.1139/cjps-2017-0342>

- MUGABOWINDEKWE, M., MUYIZERE, A., LI, F., QIAO, Y., & RWANYIZIRI, G. (2018). *Application of Multi-Temporal MODIS NDVI Data to Assess Practiced Maize Calendars in Rwanda*. 9(3), 9.
- Nakano, T., Bavuudorj, G., Urianhai, N. G., & Shinoda, M. (2013). Monitoring aboveground biomass in semiarid grasslands using MODIS images. *Journal of Agricultural Meteorology*, 69(1), 33-39. <https://doi.org/10.2480/agrmet.69.1.1>
- Norberto Martínez. (2010). *APUNTES SOBRE MODELACIÓN DE NICHOS ECOLÓGICOS - PDF*. <https://docplayer.es/41103765-Apuntes-sobre-modelacion-de-nichos-ecologicos.html>
- Olarte, J. S., Martínez, J. Z., & Cerón, S. L. (2015). *IMPACTO DE LA DINÁMICA DEL INTERMEDIARIO EN EL INGRESO DEL PRODUCTOR DE AMARANTO DURANTE LA COMERCIALIZACIÓN EN TOCHIMILCO, PUEBLA*. 16.
- Ortega Hernández, A., León Andrade, M., & Ramírez Valverde, B. (2010). Agricultura y crisis en México: Treinta años de políticas económicas neoliberales. *Ra Ximhai*, 323-338. <https://doi.org/10.35197/rx.06.03.2010.01.ao>
- Ortega, R., Flores, L., INIA, C. Q., de Recursos Naturales, D., & Ambiente, M. (1999). Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico. *Ministerio de Agricultura, Instituto de investigaciones agropecuarias. CRI Quilamapu.(Chile)*, 13-46.
- Paegelow, M. (2003). *CADENAS DE MARKOV, EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y EVALUACIÓN MULTIOBJETIVO PARA LA MODELIZACIÓN PROSPECTIVA DEL PAISAJE*. 23.
- Paltsyn, M. Yu., Gibbs, J. P., Iegorova, L. V., & Mountrakis, G. (2017). Estimation and Prediction of Grassland Cover in Western Mongolia Using MODIS-Derived Vegetation Indices. *Rangeland Ecology & Management*, 70(6), 723-729. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2017.05.005>
- Peng, W., Kuang, T., & Tao, S. (2019). Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China. *Journal of Cleaner Production*, 233, 353-367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.355>

- Pérez, E., Chávez, M. del C., & González, J. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1).
- Pérez Vázquez Arturo, & Landeros Sánchez Cesáreo. (2009). Agricultura y deterioro ambiental. 73, 16, 19-25.
- Pérez-Cruz, J. R., & Rappo-Miguez, S. E. (2016). Opciones de política ambiental para garantizar la sustentabilidad de la agroindustria azucarera en Puebla, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 13(2), 193. <https://doi.org/10.22231/asyd.v13i2.326>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2015). Mechanistic and Correlative Models of Ecological Niches. *European Journal of Ecology*, 1(2), 28-38. <https://doi.org/10.1515/eje-2015-0014>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Loveland, T. R., & Pittman, K. (2008). Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3708-3719. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.006>
- Raghavan, R. K., Barker, S. C., Cobos, M. E., Barker, D., Teo, E. J. M., Foley, D. H., Nakao, R., Lawrence, K., Heath, A. C. G., & Peterson, A. T. (2019). Potential Spatial Distribution of the Newly Introduced Long-horned Tick, *Haemaphysalis longicornis* in North America. *Scientific Reports*, 9(1), 498. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37205-2>
- Ramírez-Juárez, J. (2013). El papel de la agricultura familiar en regiones agrarias frágiles y en el desarrollo rural. La cordillera del Tenzto, Puebla, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 10(4), 459. <https://doi.org/10.22231/asyd.v10i4.137>
- Reynolds, C., Marco Antonio. (2014). *Uso de labranza vertical y agricultura de precisión para la optimización de energía en labranza primaria del suelo* [Texto, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. PDF. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/7550>
- Robertson, T., Döring, M., Guralnick, R., Bloom, D., Wiczorek, J., Braak, K., Otegui, J., Russell, L., & Desmet, P. (2014). The GBIF Integrated Publishing Toolkit: Facilitating the Efficient

Publishing of Biodiversity Data on the Internet. *PLoS ONE*, 9(8), e102623.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102623>

Roca, L. B., Guzmán, B. H., Gómez, A. M. B., Sosa, E. H., Pérez, M. G., & Navarro, B. A. (2009).

*CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y TAMIZAJE FITOQUÍMICO DE LA ESPECIE Tagetes erecta Lin. 7.*

Rodríguez, P., Hermida, A., & Huesca, J. (2012). El altar de muertos: Origen y significado en México.

*La Ciencia y el hombre.*

*Enfoque de estudio territorial apoyado de Sistemas de Información Geográfica para definir*

*territorios apícolas en Misantla, Veracruz- México, 22 (2016) (testimony of Roque Peña, Juan*

*Gabriel, Luna Chontal, Giovanni, Fernández Lambert, Gregorio, Tiburcio Álvarez, Isaí, &*

*Hernández y González, Tito Armando). [citt.itsm.edu.mx/documentos/cii/cii\\_2\\_0\\_1\\_4](http://citt.itsm.edu.mx/documentos/cii/cii_2_0_1_4)*

*interdisciplinario . pdf*

Rubio, B. (2006). *Territorio y globalización en México: ¿Un nuevo paradigma rural? 56(12), 1047-*

*1054.*

Rueda Calier, F., Peñaranda Mallungo, L. A., Velásquez Vargas, W. L., & Díaz Báez, S. A. (2015).

Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota

orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI

(índice de vegetación de diferencia normalizada). *Corpoica Ciencia y Tecnología*

*Agropecuaria, 16(1), 25. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol16\\_num1\\_art:377](https://doi.org/10.21930/rcta.vol16_num1_art:377)*

SAGARPA. (2017). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Cultivos estratégicos con*

*potencial de mercado. [https://www.gob.mx/sagarpa/documentos/cultivos-estrategicos-](https://www.gob.mx/sagarpa/documentos/cultivos-estrategicos-con-potencial-de-mercado?idiom=es)*

*con-potencial-de-mercado?idiom=es*

Sánchez Albarrán, A. (2016). *Sociología rural y nueva ruralidad sur-sur. 25(3), 49-63.*

Santacolma Varón, Luz Elena. (2015). *Importancia de la economía campesina en los contextos*

*contemporáneos: Una mirada al caso colombiano | Entramado. 11(2), 38-50.*

<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2015v11n2.22210>

- Serrato Cruz Miguel Angel, Grimaldo-Juárez, O., & González-Hernández, V. A. (1998). ANÁLISIS DE CRECIMIENTO Y EVOLUCIÓN BAJO DOMESTICACIÓN EN DOS. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, IV(02), 75-82. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1998.01.011>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (s. f.). Recuperado 24 de noviembre de 2018, de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Shrestha, R., Di, L., Yu, E. G., Kang, L., Shao, Y., & Bai, Y. (2017). Regression model to estimate flood impact on corn yield using MODIS NDVI and USDA cropland data layer. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(2), 398-407. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61502-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61502-2)
- SIAP, S. de I. A. y P. (2019). PUEBLA PRODUCE EL 76% DE FLOR DE CEMPASÚCHIL A NIVEL NACIONAL. <http://www.gob.mx/agricultura%7Cpuebla/articulos/puebla-produce-el-76-de-flor-de-cempasuchil-a-nivel-nacional>
- Sifuentes, E., Macías, J., Ojeda, W., González, V. M., Salinas, D. A., & Quintana, J. G. (2016). Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: Aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 21.
- 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(2), 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- Sulla-Menashe, D., Kennedy, R. E., Yang, Z., Braaten, J., Krankina, O. N., & Friedl, M. A. (2014). Detecting forest disturbance in the Pacific Northwest from MODIS time series using temporal segmentation. *Remote Sensing of Environment*, 151, 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.042>
- Torres, I., Casas, A., Delgado-Lemus, A., & Rangel-Landa, S. (2009). *Aprovechamiento, demografía y establecimiento de Agave potatorum en el Valle de Tehuacán, México: Aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable*. 18.

- Varela, S., Mateo, R. G., García-Valdés, R., & Fernández-González, F. (2014). *Macroecología y ecoinformática: Sesgos, errores y predicciones en el modelado de distribuciones*. 8.
- Watanabe, M., Ishizuka, A., & Ishizuka, K. (2018). Improvement of Principal Component Analysis for Quantification of Spectrum-Imaging Datasets. *Microscopy and Microanalysis*, 24(S1), 576-577. <https://doi.org/10.1017/S1431927618003379>
- Xu, C., & Katchova, A. L. (2019). Predicting Soybean Yield with NDVI Using a Flexible Fourier Transform Model. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 1-15. <https://doi.org/10.1017/aae.2019.5>
- Zhang, X., Lu, X., & Wang, X. (2015). Spatial-Temporal NDVI Variation of Different Alpine Grassland Classes and Groups in Northern Tibet from 2000 to 2013. *Mountain Research and Development*, 35(3), 254-263. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00110.1>
- Zuccarini, J. G. (1833). *Über einige pflanzen aus den gattungen Agave und Fourcroya*. publisher not identified.