



"ENSEÑAR LA EXPLOTACIÓN DE
LA TIERRA, NO LA DEL HOMBRE"

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
INSTITUTO DE HORTICULTURA**

**ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DE CULTIVOS
POTENCIALES EN LA CIENEGA DE CHAPALA.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

PRESENTA:

FRANCISCO ESTRADA GODOY

DIRECTOR:

DR. ROGELIO CASTRO BRINDIS

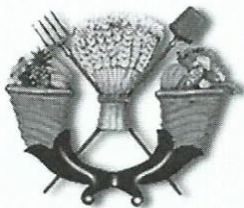
Chapingo, México., julio de 2014.



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES



Instituto de Horticultura



Esta tesis titulada: "Zonificación agroecológica del cultivos potenciales en la Ciénega de Chapala", fue realizada por el C. Francisco Estrada Godoy bajo la dirección de Dr. Rogelio Castro Brindis y ha sido revisada por los miembros de jurado examinador como requisito parcial para obtener el título de Doctor en Ciencias en Horticultura.

*"ENSEÑAR LA EXPLOTACIÓN DE
LA TIERRA, NO LA DEL HOMBRE"*

JURADO

Dr. Rogelio Castro Brindis
Presidente

Dr. Mario Pérez Grajales
Asesor

Dr. David Cristóbal Acevedo
Asesor

Dr. Juan Porfirio Legaria Solano
Asesor

Dr. Gustavo Cruz Cárdenas
Lector Externo



Instituto de Horticultura

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico para la realización de mis estudios.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por la Oportunidad de superación académica y personal.

Al Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia por la formación académica que me brindo.

Al Instituto Politécnico Nacional, por la oportunidad de superación profesional que me ha brindado.

Al Dr. Rogelio Castro Brindis por su asesoramiento, disponibilidad, dedicación y apoyo constante durante la realización del presente trabajo.

Al Dr. Mario Pérez Grajales por sus consejos, orientación y acertadas sugerencias en la realización de esta Investigación.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo por su asesoramiento, disponibilidad, dedicación y apoyo constante durante la realización del presente trabajo.

Al Dr. Juan Porfirio Legaría Lozano, por la disposición de su tiempo para la revisión de este trabajo

Al Dr. Gustavo Cruz Cárdenas, por la disposición de su tiempo para la revisión de la tesis.

A las funcionarios de la CONAGUA distrito 024-Dienega de Chápala, por la facilidades otorgadas para el desarrollo de este proyecto.

A los productores del Distrito de Riego 024-Cienega de Chapala por la información facilitada para la realización de esta investigación.

GRACIAS...

Francisco Estrada Godoy

DEDICATORÍA

A mis padres:

Francisco Estrada Bautista (f) q.e.p.d.

Ma. Paz Godoy Canela

Por todo el apoyo que me han brindado siempre para lograr un escalón más en mi superación personal, que sin su ayuda y motivación no lo hubiera logrado.

A mis hermanos Sandra, Jesse, Luis Alberto y Juan, por su cariño, amistad y apoyo que me han brindado.

A todas las bendiciones de Dios que me ha dado.

Gracias por todo...
Francisco Estrada Godoy

CONCENTRADO CURRICULAR

DATOS PERSONALES.

NOMBRE: FRANCISCO ESTRADA GODOY
LUGAR DE NACIMIENTO: MEXICALÍ, BAJA CALIFORNIA NORTE
FECHA DE NACIMIENTO: 21 DE SEPTIEMBRE DE 1977

ESTUDIOS REALIZADOS.

PROFESIONAL: UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS
CHAPINGO, EDO. DE MEXICO (1993-2001)
MAESTRIA: INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CIIDIR-IPN-MICHOACÁN (2005-2008)
CREDITOS DE DOCTORADO UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
CHAPINGO, EDO. DE MEXICO (2009-2012)

EXPERIENCIA PROFESIONAL.

FEB/2003-JUN/2003: "AGRONEGOCIOS INTEGRALES DE LA
CIENEGA, S.P.R. DE R.L." VENUSTIANO
CARRANZA, MICHOACAN.
JUL/2003-OCT/2004: SECRETARIA DE EDUCACIÓN PÚBLICA,
DGTA. B.E.D.R. No. 63, VILLAMAR, MICH.
ENE/2002 A LA FECHA: INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL. ESIA-
UNIDAD-TICOMAN. JEFE DEL
DEPARTAMENTO DE POSGRADO

ACTIVIDADES DE INVESTIGACIÓN.

Proyectos de investigación: 25
Publicaciones en Revistas JCR: 10
Cursos de actualización: 12
Conferencias nacionales: 28
Tesis dirigidas a nivel licenciatura: 3
Tesis dirigidas a nivel Maestría: 3
Asesorías a comunidades: 12

CONTENIDO

INDICE DE CUADROS	vii
INDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	4
3.1. Objetivos.....	4
3.2. Hipótesis	4
4. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	5
4.1. Zonificación agroecológica de cultivos	5
4.1.1. Métodos de zonificación.....	7
4.1.1.1. Descripción analítica.....	8
4.1.1.2. Análisis comparativo	8
4.1.1.3. Comparación experimental	8
4.1.1.4. Sistemas agrícolas normativos.....	8
4.2. Herramientas de zonificación	9
4.2.1. Método geoestadístico	9
4.2.2. Kriging.....	13
4.2.3. Análisis de Componentes Principales (ACP)	14
4.2.4. MaxEnt.....	19
4.3. Generalidades sobre los cultivos potenciales.....	21
4.3.1. Jitomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Milld).....	21
4.3.1.1. Importancia	21
4.3.1.2. Composición y valor nutricional.....	22
4.3.1.3. Descripción botánica.....	22
4.3.1.4. Raíz	23
4.3.1.5. Tallo	23
4.3.1.6. Hoja.....	24
4.3.1.6. Inflorescencia.....	24
4.3.1.7. Polinización	25
4.3.1.8. Fruto.....	25
4.3.1.9. Semilla	25
4.3.1.10. Requerimientos ambientales	25
4.3.1.10.1. Temperatura	26
4.3.1.10.2. Luz	26
4.3.1.10.3. Suelo	26
4.3.1.10.4. Riego.....	27
4.3.2. Calabaza (<i>Cucurbita spp</i>)	27
4.3.2.1. Importancia	27
4.3.2.2. Descripción botánica.....	28
4.3.2.3. Raíz	28
4.3.2.4. Tallo	28
4.3.2.5. Hoja.....	29

4.3.2.6. Zarcillos	29
4.3.2.7. Flores	29
4.3.2.8. Fruto.....	30
4.3.2.9. Pedúnculo.....	30
4.3.2.10. Semilla	31
4.3.2.11. Requerimientos ambientales	31
4.3.2.11.1. Temperatura	31
4.3.2.11.2. Luz	32
4.3.2.11.3. Humedad.....	32
4.3.2.11.4. Suelo	32
4.3.3. Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	32
4.3.3.1. Importancia	32
4.3.3.2. Descripción botánica.....	33
4.3.3.3. Sistema radical	34
4.3.3.4. Tallo verdadero.	34
4.3.3.5. Falso tallo.....	34
4.3.3.6. Tallo floral	34
4.3.3.7. Hojas	35
4.3.3.8. Fruto.....	35
4.3.3.9. Requerimientos ambientales	35
4.3.3.9.1. Temperatura	36
4.3.3.9.2. Radiación	36
4.3.3.9.3. Suelo	36
4.3.4. LECHUGA (<i>Lactuca sativa</i> , L.).....	37
4.3.4.1. Importancia	37
4.3.4.2. Descripción Botánica.....	37
4.3.4.3. Raíz	37
4.3.4.4. Tallo	37
4.3.4.5. Hojas	38
4.3.4.6. Fruto.....	38
4.3.4.7. Semilla	38
4.3.4.8. Requerimientos ambientales	39
4.3.4.8.1. Temperatura	39
4.3.4.8.2. Suelo	39
4.3.4.8.3. Humedad.....	39
4.3.5. Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> L. italica).....	39
4.3.5.1. Importancia	39
4.3.5.2. Descripción botánica.....	40
4.3.5.3. Hoja.....	40
4.3.5.4. Flores	40
4.3.5.5. Frutos	40
4.3.5.6. Requerimientos ambientales	41
4.3.5.6.1. Temperatura	41
4.3.5.6.2. Suelo	41
4.4. Uso de los sistemas de información geográfica en zonificaciones agroecológicas	41
5. MATERIALES Y MÉTODOS	43

5.1. Localización.....	43
5.2. Clima.....	45
5.3. Geología.....	47
5.4. Uso de suelo y vegetación.	49
5.5. Suelos.....	51
5.6. Metodología	52
5.6.1. Elaboración de mapas base.	52
5.7. Muestreo de suelos.....	53
5.7.1. Ubicación de los sitios de muestreo.....	53
5.7.2. Análisis físico y químico de las muestras de suelo.....	56
5.8. Datos climatológicos.....	57
5.9. Análisis Geoestadístico.....	58
5.9.1. Análisis de variabilidad espacial.....	58
5.9.2. Análisis de los datos	58
5.9.3. Selección de variograma y Kriging	58
5.9.4. Interpolación Kriging.....	59
5.9.5. Análisis de Componentes Principales.....	59
5.9.6. MaxEnt.....	60
6. RESULTADOS Y DISCUSION	61
6.1. Análisis geoestadístico.....	61
6.2. Variables edáficas	62
6.2.1. Materia orgánica (m.o.)	62
6.2.2. pH.....	63
6.2.3. Conductividad eléctrica (CE).....	64
6.2.4. Potasio K.....	65
6.4.5. Nitrógeno total (N_t).....	66
6.3. Variables climáticas.....	67
6.3.1. Temperatura máxima	67
6.3.2. Precipitación	68
6.3.3. Evaporación	69
6.4. Análisis de componentes principales.....	69
6.5. Análisis en MaxEnt.....	71
7. CONCLUSIONES	74
8. LITERATURA CITADA	75
Anexos	79

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos permisibles de semivariograma, $\gamma(h)$, de uso común en Geociencias.	12
Cuadro 2. Tipos de Vegetación.	50
Cuadro 3. Superficie de suelos del área de estudio.	51
Cuadro 4. Estructura espacial de las propiedades de suelos para la capa superficial (0-30 cm).	61
Cuadro 5. Estimaciones de contribución relativa de los predictores ambientales para el modelado en Maxent.	70
Cuadro 6. Variables originales de mayor importancia en el modelo, de acuerdo a los primeros tres CP.	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de localización de la Ciénega de Chapala.....	43
Figura 2. Localización y distribución de Distrito de riego 024-Cienega de Chapala.	44
Figura 3. Mapa de clima de la Ciénega de Chapala.....	455
Figura 4. Isoyetas del Distrito 024-Ciénega de Chapala.	466
Figura 5. Marco tectónico para el occidente del CVM.....	47
Figura 6. Geología del Distrito de riego 024 – Ciénega de Chapala.	488
Figura 7. Mapa de uso de suelo y vegetación.	49
Figura 8. Principales tipos de cultivo que se encuentran en el área de estudio.	500
Figura 9. Edafología del Distrito de riego 024-Ciénega de Chapala.	522
Figura 10. Ubicación de los puntos de muestreo en la Ciénega de Chapala.	544
Figura 11. Levantamiento de muestras de suelo en el área de estudio.	555
Figura 12. Secado de muestras de suelo.	566
Figura 13. Análisis de laboratorio.....	577
Figura 14. Variabilidad espacial de la materia organica en la Ciénega de Chapala.	622
Figura 15. Variabilidad espacial del pH en la Ciénega de Chapala.....	633
Figura 16. Variabilidad espacial de la conductividad electrica en la Ciénega de Chapala.....	644
Figura 17. Variabilidad espacial del potasio en la Ciénega de Chapala.	655
Figura 18. Variabilidad espacial del N _t en la Ciénega de Chapala.	666
Figura 19. Variabilidad espacial de la Tmax en la Ciénega de Chapala.	677
Figura 20. Variabilidad espacial de la Tmax en la Ciénega de Chapala.	68
Figura 21. Variabilidad espacial de la Evaporación en la Ciénega de Chapala.....	69
Figura 22. Mapas de idoneidad de cinco cultivos. a) brócoli (<i>Brassica oleracea</i>); b) calabacita (<i>Cucurbita pepo</i>); c) cebolla (<i>Allium cepa</i>); d) jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i>); e) lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).	733
Figura 23. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de brócoli en la Ciénega de Chapala.	800
Figura 24. Curva respuesta a la predicción del cultivo del brócoli.....	800
Figura 25. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de calabacita en la Ciénega de Chapala.	811
Figura 26. Curva respuesta a la predicción del cultivo de calabacita.....	811
Figura 27. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de cebolla en la Ciénega de Chapala.	822
Figura 28. Curva respuesta a la predicción del cultivo de cebolla.	822
Figura 29. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de Jitomate en la Ciénega de Chapala.	833
Figura 30. Curva respuesta a la predicción del cultivo de Jitomate.	833
Figura 31. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de Lechuga en la Ciénega de Chapala.	844
Figura 32. Curva respuesta a la predicción del cultivo de Lechuga.	844

ZONIFICACIÓN AGROECOLOGICA DE CULTIVOS POTENCIALES EN LA CIENEGA DE CHAPALA.

AGROECOLOGICAL ZONING OF POTENTIAL CROP IN THE CIENEGA OF CHAPALA.

Francisco **Estrada Godoy**¹ y Rogelio **Castro Brindis**²

RESUMEN

La producción de hortalizas es un rubro muy importante dentro del ámbito comercial agrícola, no sólo para la recuperación de dicho sector, sino también para el desarrollo y crecimiento del país y particularmente para el estado de Michoacán. El objetivo del presente trabajo fue determinar las condiciones agroecológicas presentes en la Ciénega de Chapala para los cultivos de jitomate, brócoli, calabacita cebolla y lechuga y definir zonas aptas para estos mediante técnicas geoestadísticas y multivariadas con información edafológica de 300 muestras de suelo y climática de 40 estaciones meteorológicas circundantes al área de estudio. Se generaron 40 predictores de las variables edafológicas y climáticas las cuales se sometieron a un análisis de componentes principales (ACP). Los

resultados del ACP mostraron que siete de los predictores tienen mayor peso de estas, Ca, evaporación anual, temperatura máxima, conductividad eléctrica, nitrógeno total, K y precipitación anual explicaron el 95% de la variabilidad agroecológica de los datos originales. Los mapas de idoneidad para las cinco especies de hortalizas se manipulo con el programa Maxent con el cual se definieron cinco zonas para estos cultivos; la zona muy apta para los cinco cultivos de hortalizas se localiza en la porción sur de la Ciénega de Chapala y las zonas aptas tienen un patrón de distribución heterogéneo, en promedio 12466 ha que representan el 34% resultan zonas aptas y muy aptas para los cultivos de calabacita, cebolla y lechuga y menos de 6002 ha que representan el 13% para jitomate y brócoli. Aproximadamente 18468 ha que representan el 40% de la

Ciénega de Chapala tiene condiciones ambientales no idóneas para los cinco cultivos. Finalmente el modelado con Maxent resultó ser una herramienta importante para definir el desarrollo de los cultivos en el presente estudio, lo cual permitirá mejorar los planes y programas de cultivos del Distrito de Riego 024 Ciénega de Chapala.

Palabras clave: Modelos de distribución de especies, geoestadística, Maxent.

ABSTRACT

Vegetable production is an important part of the agricultural trade area, not only for the recovery of this sector itself, but also for the development and progress of the country, in particular the growth of the state of Michoacán. The aim of this study was to determine the ecological conditions present in Cienega de Chapala to grow tomato, broccoli, zucchini, onion and lettuce. In addition, combining geostatistic and multivariate technics with soil data from 300 soil samples and weather information from 40

meteorological stations, this project defined suitable area for plantation of these vegetables. A total of 40 predictors based on the soil and climatic variables generated and subjected to a principal component analysis (PCA).

The PCA results showed that out of the 40 originals, seven of the predictors can explained 95% of the agro-ecological variability of the original data: Ca, annual evaporation, high temperature, electrical conductivity, total nitrogen, K and annual precipitation. Using the Maxent program, suitability maps for the five species of vegetables were made from which five zones were defined for these crops. The best area found to grow the five vegetable crops is located in the southern portion of Cienega de Chapala. Interestingly, suitable areas have a heterogeneous distribution pattern, on average, 12466 ha representing 34% are very suitable to grow zucchini, onion and lettuce and less than 6002 ha, representing 13% for tomatoes and broccoli. Approximately 18468 ha, representing 40% of Cienega de Chapala do not have the suitable

environmental conditions to grow any of the five crops. Finally the model generate with the Maxent program proved to be an important tool to define the crop development in the present study. This in turn will greatly improve the plans and programs of crops for the Irrigation District 024 Cienega de Chapala.

Keywords: Species distribution models, geostatistics, Maxent.

1 Tesista
2 Director

1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de los recursos naturales del Mundo para mantener a una población creciente es una cuestión fundamental para la comunidad internacional. La población mundial continúa creciendo un 1.6% por año, superando el 3% por año en muchos de los países menos desarrollados. Al mismo tiempo, los recursos naturales esenciales, tales como tierras y aguas, están disminuyendo en cantidad y calidad debido a factores como la competitividad entre las demandas de la industria y las grandes ciudades, la degradación y la contaminación (FAO, 1997).

El problema básico es el aumento de la presión ejercida sobre los recursos naturales. Los límites de la capacidad de producción de los recursos de tierras vienen determinados por el clima, las condiciones del suelo y la fisiografía, y por el uso y manejo aplicados a las tierras. El manejo sostenible de los recursos de tierras requiere de políticas correctas y una planificación basada en el conocimiento de estos recursos, las demandas de los usos sobre esos recursos, y las interacciones entre las tierras y el uso de las mismas. Las respuestas a las cuestiones que se relacionan a continuación proporcionan las bases para la formulación de una política acertada y para la planificación del uso de las tierras.

En respuesta, se está generando una nueva orientación de las actividades científicas y tecnológicas en el sector agropecuario, que presta especial atención al manejo integrado de cultivos y a la adecuación de prácticas agroforestales (Pérez y Geissert, 2006).

En este marco se ubican las investigaciones de zonificación agroecológica que en general se refieren al diseño de metodologías que permiten identificar los usos de tipo agropecuario que causan menos impactos ambientales. Éstas se basan en la comparación de los requerimientos ambientales de un determinado uso del suelo con respecto a las características de una determinada región (FAO, 1997).

La mayoría de las evaluaciones de aptitud en buena parte han permanecido como modelaciones y sin validar los resultados con información de campo. A nivel de la clasificación de aptitud global se genera una apreciación del potencial agrícola de la tierra, por lo general para grandes regiones, que requiere de la participación de agricultores con experiencia y parcelas experimentales para validación del estudio (Verheye, 1993).

En esta investigación se planteó utilizar MaxEnt como una herramienta alternativa para realizar zonificación de cultivos potenciales: (Jitomate, lechuga, brócoli, cebolla y calabacita), en la Ciénega de Chapala mediante técnicas geoestadísticas y análisis de componentes principales, así como su representación cartográfica, con el fin de ubicar las zonas geográficas con mayor aptitud para estos cultivos.

2. ANTECEDENTES

La zonificación agroecológica de cultivos es una herramienta multifuncional que contribuye científicamente en la gestión de proyectos de desarrollo de tierras a escala predial, local y regional.

La zonificación agroecológica (ZAE) es un proceso de identificación de áreas con características propias para el uso agrícola. Para la FAO, la ZAE define zonas con base a combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas y se centra en los requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos y en los sistemas de manejo bajo los cuales se desarrollan. La importancia de la ZAE radica en que es un método para el cuidado de los recursos naturales, al adaptar la agricultura a los mejores ambientes, siendo ésta una de las actividades más importantes de utilización del sistema natural y debe ajustarse a las áreas más aptas. Por tanto la identificación y caracterización precisa del potencial productivo de las áreas agrícolas permite la conservación y cuidado de los ecosistemas.

En México existen pocos trabajos de investigación que permitan establecer cultivos en los mejores ambientes que favorezcan su desarrollo y rendimiento. Los criterios utilizados para el establecimiento de un cultivo comúnmente depende más del mercado, de los apoyos del gobierno, o de las decisiones propias del productor. Específicamente para el cultivo de hortalizas se han generado pocos trabajos de caracterización agroecológica que sirvan de base para estudios de planeación y manejo del cultivo (Gutiérrez *et al.*, 2010).

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivos

- Delimitar áreas con condiciones agroecológicas adecuadas para el establecimiento de cultivos potenciales (jitomate, brócoli, cebolla, lechuga y calabacita), por medio de técnicas de geoestadística.
- Definir zonas geográficas para la producción de cultivos potenciales (jitomate, brócoli, cebolla, lechuga y calabacita), por medio de la generación de predictores de las variables edafológicas y climáticas.

3.2. Hipótesis

- Las características del medio natural en la región y los requerimientos agroecológicos de los cultivos potenciales determinan las zonas potenciales para el establecimiento de estos cultivos en la región.

4. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

En México, la producción de hortalizas es una actividad importante por la significativa captación de divisas que aporta a la economía nacional (Villa *et al.*, 2001). El fortalecimiento de la producción de hortalizas mediante el uso más eficiente de los recursos naturales para incrementar la productividad de estas es esencial, tanto para lograr el ingreso al país de divisas como para garantizar el abasto nacional (Romo, 1985).

4.1. Zonificación agroecológica de cultivos

La zonificación agroecológica (ZAE) se refiere a la división de la superficie de la tierra en Unidades más pequeñas, que tienen características similares relacionadas con su actitud, con la producción potencial y con el impacto ambiental (FAO, 1997).

Rodríguez *et al.* (2007), menciona que la zonificación es un proceso de sectorización de un territorio en unidades espaciales relativamente homogéneas, de acuerdo al criterio que se utilice, estos criterios pueden variar según los propósitos de zonificación y generalmente están relacionados a factores biofísicos, sociales, económicos, culturales, políticos o administrativos.

Los estudios de zonificación de cultivos juegan un papel importante en el logro de estas metas, ya que mediante estos es posible definir qué cultivos tienen mayor potencial de producción en una región determinada (Villa *et al.*, 2001). Esto se obtiene a través del análisis de clima, suelo y necesidades biofísicas de los cultivos, esta relación debe ser la base fundamental para la toma de decisiones en la delimitación de zonas agrícolas en la región de interés (Jiménez *et al.*, 2004).

Los estudios de zonificación agroecológica de cultivos (ZAE), desempeñan un papel muy importante en la delimitación de áreas, en las cuales es posible definir qué cultivos tienen mayor potencial de producción. Las investigaciones más avanzadas al respecto han incorporado bases de datos enlazadas a sistemas de información geográfica (SIG), relacionadas a modelos estadísticos, que contienen múltiples aplicaciones potenciales en el manejo de los recursos naturales y planificación del uso de la tierra (FAO, 1997).

La importancia de los estudios de zonificación de cultivos radica en que sientan las bases para la elaboración de planes y proyectos de desarrollo agrícola en cualquier nivel (nacional, estatal, regional, distrital, municipal o un área específica), el inicio de una zonificación es el análisis económico y social de los productos agrícolas que son deficitarios, la balanza del mercado nacional, internacional y las perspectivas de exportación; como resultado de este diagnóstico de mercados, se pueden elaborar listas de especies de cultivos que presenten las mejores perspectivas económicas. Sin embargo, la primera interrogante que se plantean los planificadores, es la localización de las áreas cuyas condiciones ecológicas sean adecuadas para establecer, expandir y tener éxito el cultivo de esas especies (García, 1979).

El uso la zonificación de cultivos se considera como una estrategia para incrementar la producción agrícola a través del manejo de los cultivos ya existentes relacionados con nuevas técnicas de producción y control de plagas y enfermedades, para optimizar su área de producción o introducir otras variedades o nuevos cultivos en lugares con características ambientales bien definidas (Bárcenas, 2002).

Campos (2005), describe a la zonificación de cultivos como una de las principales herramientas para disminuir los riesgos a que está sometida la agricultura. Algunas de las aplicaciones de la zonificación de cultivos son las siguientes:

- Seleccionar uno o un grupo de cultivos que se pueden establecer en un área determinada.
- Como estrategia para incrementar la producción agrícola a través del manejo de los cultivos ya existentes.
- Optimización de las áreas que actualmente se encuentran en producción.
- Introducir nuevos cultivos en lugares con características ambientales definidas.
- Introducir nuevas técnicas de producción agrícola.
- Prevención y control de plagas y enfermedades.
- Reorientar la ubicación de las áreas de cultivo de especies que se necesita incrementar.
- Conocer el potencial agroecológico de un área específica para uno o un grupo de cultivos.
- Ayuda a tomar decisiones, sobre el uso de los terrenos y la selección de tipos de cultivo.
- Contribuye a definir medidas de protección ambientales y de control de enfermedades de los cultivos.
- Ayuda a la estimación de productividad sostenida, su variabilidad y riesgo de falla.
- Obtención de rendimientos potenciales probables en temporal y bajo riego.
- Auxilia en la formulación de programas de fertilización y control de plagas.

4.1.1. Métodos de zonificación

Una gran cantidad de métodos de análisis agroecológico se están desarrollando. Se considera que se utilizan principalmente cuatro enfoques metodológicos:

4.1.1.1. Descripción analítica. Se están realizando muchos estudios que miden y describen cuidadosamente los sistemas agrícolas y miden propiedades específicas tales como diversidad de plantas, acumulación de biomasa, retención de nutrientes y rendimiento. El Centro Internacional de Agroforestería (ICRAF) ha estado desarrollando una base internacional de datos de los diferentes tipos de sistemas de agroforestería y los está correlacionando con una variedad de parámetros ambientales para desarrollar modelos regionales de cultivos mixtos (Nair 1984, Huxley 1983).

4.1.1.2. Análisis comparativo. La investigación comparativa generalmente involucra la comparación de un monocultivo u otro sistema de cultivo con un agroecosistema tradicional de mayor complejidad. Los estudios comparativos de este tipo implican un análisis de la productividad de cultivos específicos, de la dinámica de la plagas o del estatus de los nutrientes en cuanto están relacionados con factores tales como la diversidad de los campos de cultivos, la frecuencia de las malezas, la población de insectos y los patrones de reciclaje de nutrientes. Varios estudios de este tipo se han llevado a cabo en América Latina, África y Asia (Glover y Beer, 1986; Uhl y Murphy, 1981; Irvine, 1987; Marten 1986 y Woodmansee, 1984).

4.1.1.3. Comparación experimental. Para establecer la dinámica y para reducir el número de variables, muchos investigadores desarrollan una versión simplificada del sistema nativo en el cual las variables pueden ser controladas más de cerca. Por ejemplo, el rendimiento de un cultivo mixto de maíz, frijol y calabaza puede ser comparado con el cultivo simple de cada una de estas especies.

4.1.1.4. Sistemas agrícolas normativos. Estos se construyen a menudo con modelos teóricos específicos en mente. Un ecosistema natural puede ser ilimitado, o un sistema agrícola nativo podría ser reconstituido con mucho esfuerzo. Este enfoque está siendo evaluado en forma experimental por varios investigadores en Costa Rica. Ellos están desarrollando sistemas de cultivos que emulan las

secuencias sucesionales por medio del uso de cultivos que son botánica y morfológicamente semejantes a las plantas que naturalmente ocurren en varias etapas sucesionales (Hart 1979; Ewel, 1986).

4.2. Herramientas de zonificación

4.2.1. Método geoestadístico

Para diversas áreas de la ciencia es necesario el conocimiento de la distribución espacial de fenómenos, especies, propiedades y recursos. La necesidad de cuantificar estadísticamente el grado y la escala espacial en que cambian ciertas propiedades que no son espacialmente predecibles es lo que originó la creación de la geoestadística, esto sucedió en la segunda mitad del siglo XX, cuando geólogos e ingenieros de minas se encontraron con la necesidad de desarrollar herramientas estadísticas que cuantificaran el grado y escala de variación espacial de recursos mineros que no podían percibir visualmente, pero cuyo patrón espacial necesitaban conocer para incrementar la eficiencia en la explotación de dichos recursos (Gallardo, 2006).

Posteriormente, desde comienzos de la década del 90, comenzaron a desarrollarse tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada con los aspectos de la producción agrícola, para mejorar los rendimientos y preservar la calidad ambiental (Pierce y Nowak, 1999). La variabilidad debe conocerse y ser de suficiente magnitud para que un manejo diferenciado por sitios resulte en un beneficio frente al manejo uniforme.

La estadística clásica es la disciplina que inició el estudio de la variabilidad del suelo; sin embargo, sus evaluaciones sólo incluyen generalizaciones en cuanto a la magnitud de la variación, suponiendo que ésta se encuentra aleatoriamente dentro del área de interés (Marriott *et al.*, 1997). Stoyan *et al.* (2000) mencionan que la estadística clásica paramétrica no puede usarse para evaluar datos autocorrelacionados sin violar el supuesto central de independencia de muestras.

Teóricamente todas las muestras están autocorrelacionadas, es decir, de acuerdo con el enfoque geoestadístico, para las propiedades del suelo, las mediciones resultantes de las muestras tomadas a menor distancia en el espacio o el tiempo, tienden a ser más similares que las tomadas a mayor distancia en el espacio o tiempo unas de otras. Como resultado los predictores de las propiedades del suelo tienden a mostrar patrones en lugar de aleatoriedad, valores bajos tienden a estar cerca de otros valores bajos y valores altos tienden a estar cerca de otros valores altos.

El análisis de la variación para determinar la estructura espacial se consigue mediante procedimientos de autocovarianza, autocorrelación o semivarianza. La función de autocovarianza, $C(h)$, y de autocorrelación $\eta(h)$ miden el grado de similitud o correlación para las muestras localizadas en el espacio separado por el intervalo de distancia h . La función $C(h)$ se define por:

$$C(h) = 1/N(h) \sum_{i=1}^{N(h)} [(z(x_i) - m_{-h}) * (z(x_i + h) - m_{+h})]$$

Donde $N(h)$ es el número total de pares de muestras separados por un intervalo de distancia o tiempo h , $z(x_i)$ es el valor de la muestra en el lugar o tiempo, x_i ,

$$m_{-h} = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} z(x_i)$$

es la media del conjunto de datos $-h$ además de $z(x_i)$ (conocido como datos “tailset”), y

$$m_{+h} = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} z(x_i + h)$$

es la media conjunto de datos $+h$ además de $z(x_i)$ (conocido como “**headset**” data). La función de autocorrelación o semivarianza $\eta(h)$, es una forma normalizada de la función de autocovarianza y es obtenida dividiendo la autocovarianza entre la variación media geométrica de los datos “**tailset**” y “**headset**”

$$\eta(h) = \frac{C(h)}{\sqrt{\sigma_{-h}^2 \sigma_{+h}^2}}$$

donde

$$\sigma_{-h}^2 = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - m_{-h}]^2$$

es la varianza de los datos “**tailset**”, y

$$\sigma_{+h}^2 = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h) - m_{+h}]^2$$

es la varianza de los datos “**headset**”.

El semivariograma es la función básica que describe la variabilidad espacial de un fenómeno, nos dice cómo son de parecidas las muestras en el espacio a medida que estas se encuentran más alejadas, proporciona información del comportamiento espacial de la variable. Sin embargo, es necesario ajustar una función para cuantificar el grado y escala de variación espacial. Existen numerosos modelos que se utilizan en geostatística, los cuales son ajustados al semivariograma por dos razones principales: separar las interferencias aleatorias de los resultados de la semivarianza desde el patrón estructural subyacente y permite extraer una serie de parámetros que se usarán para la interpolación geoestadística (*Kriging*) y que define el grado y escala de variación espacial (Deutsch and Journel, 1998). Estos parámetros son el *rango* (A_0), el *nugget* (C_0), el *sill* (C_0+C), y la proporción de la varianza explicada por el espacio (C/C_0+C).

El *rango* (A_0) es la distancia a la que la semivarianza deja de aumentar, indica la distancia a partir de la cual las muestras son espacialmente independientes unas de otras, y representa el tamaño de grano o mancha que representa la variable (Paramá, 2006). El *nugget* (C_0) es la varianza no explicada por el modelo, y se calcula como la intercepción con el eje Y. Se conoce también como varianza error puesto que la varianza de dos puntos separados por 0 metros (la intercepción con el eje Y) debería ser cero. Es por ello que esta varianza está normalmente indicando variabilidad a una escala inferior a la muestreada. El *sill* es la máxima semivarianza encontrada entre pares de puntos.

Cuadro 1. Modelos permisibles de semivariograma, $\gamma(h)$, de uso común en Geociencias.

Nombre	Ecuación ^a	
Pure nugget	$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ c_0 h & 0 \end{cases}$	
Linear-plateau with nugget	$\gamma(h) = c_0 + \begin{cases} 0 \left(\frac{h}{a}\right) & 0 \leq h < a \\ c_0 h & h \geq a \end{cases}$	
Spherical with nugget	$\gamma(h) = c_0 + \begin{cases} c \left[1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] & 0 \leq h < a \\ c & h \geq a \end{cases}$	
Exponential ^c with nugget	$\gamma(h) = c_0 + c \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right] \quad h \geq 0$	
Gaussian ^c with nugget	$\gamma(h) = c_0 + c \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{h}{a}\right)^2 \right] \right\} \quad h \geq 0$	
Linear with nugget	$\gamma(h) = c_0 + (m * h) \quad h \geq 0$	
Power with nugget	$\gamma(h) = c_0 + (m * h^p) \quad h \geq 0; \quad 0 < p < 2$	

^a γ = semivarianza; h = lag; a = rango; c_0 = nugget; c = escala; $(c_0 + c)$ = sill; $m = p$ = parámetros de ajuste empíricos.

4.2.2. Kriging

Es un término general que describe un método geoestadístico para la interpolación en los lugares muestreados. Hay varios tipos de métodos univariados kriging incluyendo el puntual (Burgess and Webster, 1980), indicador (Journel, 1986), disyuntivo (Yates *et al.*, 1986), universal (Webster and Burgess, 1980) y block kriging (Webster and Burgess, 1980).

El interpolador kriging utiliza la información del modelo de semivariograma acerca de la estructura espacial de la propiedad medida. Para utilizar métodos kriging, se debe cumplir con la hipótesis intrínseca (Warrick *et al.*, 1986). Se afirma que la media de la propiedad medida es estacionaria y el semivariograma en cualquier distancia es finito y no depende de la ubicación. Esto significa que la expectativa de los cuadrados de las diferencias entre los valores depende sólo de la distancia de separación y no en el lugar. Si estas condiciones no se cumplen, la propiedad medida no es estacionaria y el uso de kriging no es apropiado (Warrick, 2002), su empleo requiere la asunción de estacionaridad de segundo orden, es decir, al menos la varianza debe ser igual en las diferentes zonas del área de estudio.

Kriging puntual es un interpolador lineal, que resume los valores ponderados para las mediciones en lugares vecinos de ubicaciones no muestreadas. La expresión utilizada en kriging es:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i$$

Donde Z_0 es el valor interpolado, N es el número de puntos vecinos de la ubicación interpolada, Z_i representa los valores medidos de los puntos vecinos, λ_i es el factor de ponderación kriging para cada uno de los valores medidos. Los factores de ponderación deben sumar la unidad de manera que el valor esperado en los puntos interpolados menos los puntos medidos es cero. Si la interpolación

se produce en un lugar donde la medida del valor existe, el factor de ponderación es la unidad para del punto medido en la ubicación a ser interpolado, y los factores de ponderación para todos los sitios vecinos son cero.

4.2.3. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Este método fue primeramente descrito por Karl Pearson en 1901 y desarrollado por Hotelling en 1933 tal como se conoce ahora (Manly, 1994). Este método es uno de los más difundidos entre las técnica multivariadas, la fase esencial consiste en hacer combinaciones lineales estandarizadas de la p variables cuantitativas originales, correlacionadas en alguna medida y transformándolas en p nuevas variables cuantitativas no correlacionadas entre sí, conocidas como “Componentes Principales” (CP) (Zamudio y Alvarado, 2000).

Vivanco (1999) menciona que este análisis estadístico multivariado tiene el objetivo de convertir un problema de información estadística muy compleja (muchas variables de tipo cuantitativo medidas en cada unidad de observación) en otro casi equivalente pero más manejable (pocas variables nuevas) sin pérdida significativa de la información. El método obtiene combinaciones lineales de todas las variables originales que sean ortogonales entre sí, pero que están altamente correlacionadas con las variables originales, denominadas Componentes Principales, las que ordenadas en forma decreciente según su varianza, permiten explicar el porcentaje de variabilidad de los datos por cada componente. Los valores y vectores característicos se obtienen diagonalizando la matriz de varianza y covarianza o alternativamente la matriz de correlaciones cuando se tienen variables con diferentes unidades de medida, y cada variable aporta con la misma importancia, consecutivamente, cada observación de la muestra obtiene una puntuación en cada uno de los componentes principales seleccionados, lo que permite ordenar las observaciones en base a información multivariada.

Zarate y Ramírez (2004) señalan que algunos de los usos del ACP son:

- La reducción de la cantidad de variables, mediante la generación de combinaciones lineales de las variables originales y por medio de la eliminación de variables cuya contribución en la explicación de la varianza total sea mínima.
- La generación de índices, cuya interpretación facilita la explicación del fenómeno bajo estudio.
- El análisis de agrupaciones o la comprobación de agrupaciones previas.

El análisis de componentes principales describe la variación de un conjunto de variables correlacionadas, $X_1, X_2, \dots, X_q$, en términos de nuevo conjunto de variables no correlacionadas, $Y_1, Y_2, \dots, Y_q$, cada una de ellas es una combinación lineal de las variables X . Las nuevas variables se derivan en orden decreciente de importancia en el sentido de que Y_1 representa como parte de la variación en los datos originales entre todas las combinaciones lineales de $X_1, X_2, \dots, X_q$. Entonces Y_2 se elige para tener en cuenta tanto como sea posible de la variación restante, sujeto a ser correlacionadas con Y_1 , y así sucesivamente. Las nuevas variables definidas por este proceso, $Y_1, Y_2, \dots, Y_q$, son los componentes principales (Everitt, 2005).

El primer componente principal de las observaciones es la combinación lineal de las variables originales cuya varianza es mayor entre todas las posibles combinaciones lineales. El segundo componente principal se define como la combinación lineal de las variables originales que representa una máxima proporción de varianza restante de ser correlacionadas con el primer componente principal. Los componentes principales se definen de manera similar.

El primer componente principal Y_1 es una combinación lineal de la muestra cuya varianza es mayor entre todas las combinaciones lineales.

$$Y_1 = a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + \dots + a_{1q} X_q$$

Dado que la varianza de Y_1 podría aumentar sin límite simplemente mediante el incremento de los coeficientes $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1q}$ (a_1), debe aplicarse una restricción

que consiste en que la suma de los cuadrados de los coeficientes de $\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1$ debe tener el valor de uno.

El segundo componente principal $\mathbf{y}_2$ es la combinación lineal

$$\mathbf{y}_2 = a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + \dots + a_{2q} X_q$$

$$\mathbf{y}_2 = \mathbf{a}'_2 \mathbf{x} \text{ donde } \mathbf{a}'_2 = [a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2q}] \text{ y } \mathbf{x}' = [X_1, X_2, \dots, X_q].$$

que tiene la mayor varianza sujeto a las siguientes dos condiciones:

$$\mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_2 = 1$$

$$\mathbf{a}'_2 \mathbf{a}_1 = 0$$

La segunda condición asegura que $\mathbf{y}_1$ y $\mathbf{y}_2$ son correlacionados.

De manera similar el componente principal j es que la combinación lineal $y_j = \mathbf{a}'_j \mathbf{x}$ que tiene la mayor varianza sujeto a las condiciones

$$\mathbf{a}'_j \mathbf{a}_j = 1$$

$$\mathbf{a}'_j \mathbf{a}_i = 0 \quad (i < j)$$

Para encontrar los coeficientes que definen el primer componente principal se tienen que elegir los elementos del vector $\mathbf{a}_1$ a fin de maximizar la varianza de $\mathbf{y}_1$ sujeto a la restricción $\mathbf{a}'_1 \mathbf{a}_1 = 1$.

Los otros componentes se derivan de manera similar, con $\mathbf{a}_i$ siendo el vector propio de $\mathbf{S}$ asociado con su mayor valor propio. Si los valores propios de $\mathbf{S}$ son $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$, entonces ya que $\mathbf{a}'_i \mathbf{a}_i = 1$ la varianza del componente principal i está dado por λ_i . La variación total de los componentes principales q será igual a la varianza total de las variables originales.

$$\sum_{i=1}^q \lambda_i = s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_q^2$$

donde s_i^2 es la varianza de la muestra de x_i .

$$\sum_{i=1}^q \lambda_i = \text{trace} (\mathbf{S})$$

Los primeros componentes principales m , donde $m < q$ representan una proporción $P^{(m)}$ de la variación total de los datos originales, donde

$$P^{(m)} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{(S)}$$

El método de ACP ha sido aplicado en distintos estudios en diversas áreas, así se pueden citar los siguientes:

Carreira y Niell (1995) aplicaron el análisis de componentes principales sobre datos multiespectrales “Landsat-TM” para la interpretación de cubiertas vegetales en las Sierras de Tejeda y Altamira. Los dos primeros componentes principales obtenidos recogieron más del 99 % de la varianza total original. Las imágenes que resultaron del primero y segundo componente principal les permitió saber que existen problemas de deforestación graves en la zona, casi un 30 % de la superficie con suelos desnudos, y hasta un 85 % si se incluyen áreas con vegetación dispersa.

Demey *et al.* (1992) usaron el ACP para la caracterización de fincas agropecuarias, utilizando como caso particular el sistema de producción de arroz Sistema de Riego Río Guárico, Venezuela. Mediante el ACP seleccionaron los primeros siete componentes que explicaron el 58.99 % de la variación total. Esto les permitió hacer una clasificación en cuatro estratos, discriminando las fincas de buen, mediano, regular y mal manejo en el cultivo del arroz.

Mallants y Reyén (1990) mediante el ACP definen regiones homogéneas de precipitación en el oeste de Bélgica y el norte de Francia utilizan datos de precipitación de tres años. Los resultados mostraron que el primer componente principal explica más del 75 % de la varianza total y está distribuido uniformemente en toda la región.

Varela *et al.* (2002) aplican el método de ACP para analizar las precipitaciones mensuales en la provincia de Buenos Aires, Argentina, utilizan dos estaciones meteorológicas con diferentes periodos de registro y en ambos casos obtuvieron dos componentes principales que explican el 90 y el 87 % de la varianza de los datos originales, estos componentes representan dos patrones de precipitaciones extremos en la región y obtienen la definición de dos regiones fuertemente asociadas a estos dos patrones de precipitación extremos y una zona de transición.

Martínez *et al.* (2006), realizaron un estudio para determinar zonas agroclimáticas para la producción de mango en Veracruz, México, mediante el ACP derivaron dos vectores asociados con la temperatura mínima anual y precipitación total anual, que juntos explican el 83 % de la variación climática total entre las localidades productoras de mango “Manila”, lo que les permitió definir dos grupos de localidades con agroclimas diferentes.

Torrente y Torres (2010) utilizaron el ACP en la interpretación de sistemas agroecológicos en el manejo de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el cultivo de la caña de azúcar. Obtuvieron como resultados que las variables longitud del tallo, grosor del tallo, ancho de la hoja, número de hojas y área foliar, fueron las que más aportaron al sistema evaluado. Además, concluyeron que las variables del tallo dentro de los sistemas biológicos como el modo de nutrición de las plantas aportan mayor variabilidad a los indicadores productivos.

Se han realizado trabajos de investigación donde se han aplicado ACP, en las áreas social y económica, como el realizado por Pérez *et al.* (2006), quienes aplicaron el ACP a la inmunización financiera en el mercado Español. Ordoño (1980) mediante el uso de ACP y correlación canónica, analiza las variables socioeconómicas del estado de Tlaxcala.

4.2.4. MaxEnt

MAXENT es el acrónimo de *máxima entropía*, un algoritmo que ha sido adaptado para la construcción de modelos de distribución potencial, es un programa para el modelado de la distribución de especies utilizando los registros de su presencia. Los modelos de distribución de especies (SDM) estiman la relación entre registros de especies en los sitios y las características ambientales y/o espacial de los sitios (Franklin, 2009).

En las últimas dos décadas, ha habido muchos avances en el campo del modelado de distribución de especies, y múltiples métodos están disponibles. MaxEnt estima la distribución de las especies encontrando la distribución de máxima entropía (es decir, más cercana a uniforme) sujeto a las restricciones por los valores de las variables ambientales en las localidades conocidas de la especie (Elith *et al.*, 2006).

Maxent hace predicciones o inferencias a partir de información incompleta. Sus orígenes se encuentran en la mecánica estadística (Jaynes, 1957) la cual es enfocada al modelado de distribución de especies utilizando datos de presencia. La idea es estimar la probabilidad de distribución objetivo encontrando la probabilidad de distribución de máxima entropía, sujeto a un conjunto de restricciones que representa la información incompleta. La información disponible sobre la distribución objetivo a menudo se presenta como un conjunto de valores reales de las variables, denominado "atributo", y las limitaciones son que el valor esperado de cada atributo debe coincidir con su promedio empírico (el valor promedio de un conjunto de puntos de muestra tomadas a partir de la distribución objetivo).

Cuando Maxent es utilizado para el modelaje de distribución de especies, los píxeles del área de estudio representan el espacio en el que se define la distribución de probabilidad, los píxeles con los registros de la presencia de especies conocidas constituyen los puntos de muestreo y los atributos son las

variables climáticas, de altura, tipo de suelo, tipo de vegetación u otras variables ambientales.

Maxent ofrece muchas ventajas entre las que se encuentran las siguientes:

- Se requiere sólo del registro de los puntos de entrenamiento así como la información ambiental del área de estudio.
- Puede utilizar datos continuos y categóricos e incorporar interacciones entre las distintas variables.
- Eficientes algoritmos deterministas que garantizan la óptima convergencia (máxima entropía) de la probabilidad distribución.
- La distribución de probabilidad Maxent tiene una definición matemática concisa, y por tanto es susceptible de análisis.
- El exceso de ajuste puede ser evitado mediante el uso de ℓ_1 regularización.
- La salida es continua, permitiendo distinciones finas entre lo ideal del modelado en las diferentes áreas. Si se requieren las predicciones binarias, permite gran flexibilidad en la elección del umbral.
- Maxent también podría aplicarse a las especies de presencia/ausencia de datos mediante un modelo condicional.
- Maxent hace una aproximación generativa, en lugar de discriminar, que puede ser una ventaja inherente cuando la cantidad de datos de entrenamiento es limitada.
- El Modelado de Máxima entropía es un área de investigación activa en estadística y aprendizaje automatizado, y los avances en estos campos pueden ser fácilmente aplicados (Phillips *et al.*, 2004, 2006, 2008).

Cuando se aproxima a una probabilidad de distribución desconocida el mejor enfoque es asegurar que la aproximación satisface todas las restricciones sobre la distribución desconocida y que sujeto a estas limitaciones la distribución debe tener la máxima entropía (Jaynes, 1957). La distribución π asignada a probabilidad no negativa $\pi(\mathbf{x})$ para cada punto $\mathbf{x}$, y estas probabilidades suman 1. La

aproximación de π es también una probabilidad de distribución que se denota $\hat{\pi}$. La entropía de $\hat{\pi}$ es definida como:

$$H(\hat{\pi}) = - \sum_{x \in X} \hat{\pi}(x) \ln \hat{\pi}(x)$$

donde $\ln$ es el logaritmo natural. La entropía no es negativa, es solamente el logaritmo natural del número de elementos en X .

En la estimación de la densidad de máxima entropía, la verdadera distribución de una especie se representa como una distribución de probabilidad π sobre el conjunto X de los sitios en el área de estudio.

4.3. Generalidades sobre los cultivos potenciales

4.3.1. Jitomate (*Lycopersicon esculentum* Milld)

La palabra jitomate procede del náhuatl *xictli*, ombligo y *tomātl*, tomate, que significa *tomate de ombligo*. El tomate ya se cultivaba 700 años a.C. en México, y en el antiguo Perú antes de la formación del Imperio Inca. Como una curiosidad, debe notarse que aunque la palabra tomate viene del náhuatl *tomatl*, en el sur de México el tomate es conocido como jitomate, mientras que se le llama tomate al tomatillo o tomate verde (*Physalis ixocarpa*).

4.3.1.1. Importancia

El jitomate es la hortaliza más extensamente cultivada en el mundo, después de la papa. Durante el año 2011, la producción mundial de jitomate fue de 123, 999,792 toneladas, siendo los principales países productores en orden de importancia: China, Estados Unidos, Turquía, Italia, India, Egipto, España, República Islámica, Brasil y México. En los últimos seis años, de acuerdo a datos de la FAO, México

ha ocupado el décimo lugar como productor en el mundo. En el terreno de las exportaciones, durante el año 2010, México, ocupó el segundo lugar, es decir, nuestro País, tiene más representatividad en el ámbito de las exportaciones. Los principales Estados productores son: Sinaloa, Baja California, San Luis Potosí, Michoacán y Jalisco, siendo el primer Estado el mayor productor y exportador de nuestro País. El principal destino es Estados Unidos de América. En el Estado de Sinaloa, en la Zona Norte, la siembra se realiza en los meses de agosto a enero y la producción, comprende de febrero a junio, mientras que en la Zona Sur- Centro, la siembra se lleva a cabo en los meses de agosto a diciembre y la cosecha de noviembre a junio. Cabe realzar, que este Estado cuenta con tecnología de punta, permitiendo altos rendimientos al cultivo.

4.3.1.2. Composición y valor nutricional

El tomate es un alimento con escasa cantidad de calorías. De hecho, 100 gramos de tomate aportan solamente 18 kcal. La mayor parte de su peso es agua y el segundo constituyente en importancia son los hidratos de carbono. Contiene azúcares simples que le confieren un ligero sabor dulce y algunos ácidos orgánicos que le otorgan el sabor ácido característico. El tomate es una fuente importante de ciertos minerales (como el potasio y el magnesio). De su contenido en vitaminas destacan la B1, B2, B5 y la vitamina C. Presenta también carotenoides como el licopeno (pigmento que da el color rojo característico al tomate). La vitamina C y el licopeno son antioxidantes con una función protectora de nuestro organismo. Durante los meses de verano, el tomate es una de las fuentes principales de vitamina C. En la tabla de la derecha se provee información sobre los principales constituyentes nutritivos del tomate.

4.3.1.3. Descripción botánica

Lycopersicon esculentum contiene cultivares de porte erecto o rastrero, en los tipos primitivos la ramificación es escasa y se presenta especialmente en la parte inferior del tallo. Las plantas de crecimiento indeterminado, presentan un crecimiento monopodial en el eje central de la planta y sus ramas. Llevan en el ápice una yema vegetativa, de modo que crecen indefinidamente. El tallo y las ramas, de las yemas axilares brotan hojas e inflorescencias, la norma es que entre

dos inflorescencias haya generalmente tres hojas. La planta determinada, tiene un crecimiento distinto al anterior, la cual se debe a un gene recesivo que afecta el crecimiento del tallo y las ramas al emitir una inflorescencia terminal, y hay un número menor de hojas entre dos inflorescencias (León, 1987)

4.3.1.4. Raíz

El sistema radical consiste en una raíz principal de la que salen raíces laterales y fibrosas, formando un conjunto que puede tener un radio hasta de 1.5 metros. Sin embargo cuando se practica el trasplanta se destruye la raíz principal y lo más común es que presente una masa irregular de raíces fibrosas (León, 1987). La mayor parte de las raíces está situada en la capa de suelo que se extiende desde 5 cm hasta 60-70 cm de profundidad. Además de raíces verdaderas, la planta de tomate fácilmente forma raíces adventicias en cada parte del tallo que se encuentre en contacto con el suelo húmedo y suelto (Guenkov, 1974).

4.3.1.5. Tallo

León (1987) describe que el tallo de las plantas jóvenes es cilíndrico, más tarde se hace angular. Está cubierto de finos bellos unos largos, y otros cortos. Los últimos segregan una sustancia viscosa de color verde oscuro y olor específico para el tomate. Según características hereditarias de las variedades y la influencia del modo de cultivo el tallo alcanza alturas desde 40, 50 cm hasta más de 2 m. el tallo del tomate ramifica con profusión, las ramificaciones se forman en la axila de las hojas, la capacidad de ramificación de las diferentes variedades es distinta, unas ramifican más que otras.

Las diferencias en el crecimiento del tallo se emplean también para la clasificación de las variedades en dos grandes grupos, las cuales pueden ser indeterminadas o determinadas (Sobrino, 1989)

4.3.1.6. Hoja

Las hojas son pinnadocompuestas, de foliolos más o menos lobulados, provistos de pelos glandulosos que desprenden un olor característico muy penetrante, especialmente con el roce; son más o menos ovales y acuminados, bordes dentados, color verde intenso en el haz y verde claro en el envés (Sobrino, 1989).

4.3.1.6. Inflorescencia

Las flores se presentan formando inflorescencias que pueden ser de cuatro tipos: racimo simple, cima unípara, cima bípara y cima múltipara; pudiendo llegar a tener hasta 50 flores por inflorescencia. Normalmente, el tipo simple se encuentra en la parte baja de la planta, predominando el tipo compuesto en la parte superior (Rodríguez, 1984).

En las variedades determinadas el primer racimo se forma después de 6-7 hojas, mientras que en las indeterminadas aparece después de 7-10 hojas. En variedades indeterminadas con frecuencia los racimos se forman separados por tres hojas, i en las determinadas, a través de una o dos hojas o sin formar hojas entre los racimos, (Guenkov, 1974).

Las flores tienen un pedúnculo corto y curvo hacia abajo, por lo que asume una posición pendiente. El pedúnculo presenta al centro un engrosamiento que corresponde a la superficie de abscisión y es muy común en esta especie que un gran número de flores caiga prematuramente (León, 1987). Los pedúnculos cortos unen a las flores al eje de racimos, las flores se componen de seis sépalos y seis pétalos amarillo que en su base están unidos entre si y también unidos a los filamentos de los estambres, generalmente los estambres son seis, tienen anteras alargadas y envuelven plenamente el estilo y el estigma. Esta disposición de las flores contribuye a su auto polinización. La polinización cruzada en el tomate es un fenómeno raro y sin importancia (Guenkov, 1974).

4.3.1.7. Polinización

Las flores en un racimo o cima no se abren simultáneamente, de modo que siempre hay botones, flores y frutos en la misma ramilla. La antesis ocurre por lo común en las mañanas y 24 horas después se inicia la salida del polen. Este aparece en el lado interno de las anteras y por la posición pendiente de la flor, cae directamente sobre la superficie de los estigmas. La autopolinización es la norma en los tomates cultivados. La polinización cruzada debida a insectos ocurre en un 5 % aproximadamente (León, 1987).

4.3.1.8. Fruto

El fruto es una baya carnosa de forma muy variada. En los principales cultivares comerciales es oblada (aplanada) con rebordes longitudinales o lisa, hay también elipsoidales y piriformes. La epidermis es una capa de células de paredes externas engrosadas por la cutícula, es frecuente la presencia de pelos o glándulas que desaparecen conforme madura el fruto. De tres a cuatro estratos de colenquima junto con la epidermis forman una cáscara fina y resistente, en ella hay pigmentos amarillos o rojos dados por carotina y licopersina. El resto del fruto se forma del parénquima (León, 1987).

4.3.1.9. Semilla

Los tomates están divididos interiormente en cavidades o lóculos, variable en número según la variedad, en estas cavidades se encuentran las semillas de color blanquecino, reniformes y aplastadas, las cuales varían también en cantidad según la variedad. Una característica de esta especie es que cada semilla está envuelta por un mucílago que contiene inhibidores de la germinación, como ácido abscísico y otras sustancias, no permitiendo la germinación a pesar de que estén en condiciones de humedad y temperatura apropiadas (Sobrino, 1989).

4.3.1.10. Requerimientos ambientales

4.3.1.10.1. Temperatura

Huerres y Caraballo (1988) citados por Ruiz (1999), menciona que el crecimiento vegetativo es muy lento con temperaturas por debajo de 10 °C, así como la floración se detiene con temperaturas menores a 13 °C. las altas temperaturas afectan la floración. La temperatura óptima se encuentra entre 15 y 18 °C. Es una especie sensible al termoperiodo, las altas temperaturas nocturnas de 22 a 30 °C reducen la formación de flores. El licopeno, que es responsable de la coloración del fruto, comienza a destruirse por arriba de los 30 °C. La temperatura del suelo debe estar entre 25 y 30 °C para lograr la más alta actividad fotosintética.

4.3.1.10.2. Luz

Los tomates son exigentes en cuanto a la luz. Para que se formen buenos frutos es necesario un mínimo de luz de 5000 luxes. En caso de escasez de luz el ciclo vegetativo puede prolongarse demasiado. La escasez de luz es particularmente peligrosa durante la fase de postura, porque las plantas se alargan notablemente, se altera el equilibrio de asimilación y de desasimilación, a causa de lo cual se debilitan los primarios racimos con pocas flores (Guenkov, 1974).

4.3.1.10.3. Suelo

Desarrolla bien en suelos franco-arcillosos, pero prefiere suelos franco-arenosos de mediana fertilidad. Requiere suelos profundos por lo general mayores a 1 metro (Benacchio, 1982 citado por Ruiz, 1999). Más del 80 % de la absorción total de agua tiene lugar en la primera capa del suelo de 0.7 a 1.5 m. es moderadamente sensible a la salinidad. La disminución de rendimiento para diversos valores de conductividad eléctrica es como sigue: 0% para 2.5 mmhos/cm; 10% para 3.5 mmhos/cm, 25 % para 5.0 mmhos/cm, 50 % para 7.6 mmhos/cm y 100 % para 12.5 mmhos/cm. El periodo más sensible a la salinidad es durante la germinación y desarrollo inicial (Doorenbos y Kassam, 1979, citados por Ruiz, 1999)

4.3.1.10.4. Riego

El tomate es una planta sensible tanto a la escasez como al exceso de riego. Una vez que se ha dado el riego de plantación y como máximo un segundo riego, los agricultores suelen dejar transcurrir un cierto tiempo sin regar, para que las raíces profundicen y la planta se vea obligada en cierta manera a florecer. Una vez que la planta empieza a cuajar sus primeros frutos, el régimen de riego se hace más regular y frecuente aunque evitando los excesos (Moroto, 1989).

Doorenbos y Kassam (1979) citados por Ruiz (1999) menciona que requiere de 400 a 600 mm por periodo vegetativo. En periodos en que la evapotranspiración máxima es de 5 a 6 mm por día, la absorción de agua para atender todas las necesidades hídricas del cultivo se ve afectada cuando se ha agotado más del 40 % del agua total disponible en el suelo.

4.3.2. Calabaza (*Cucurbita spp*)

4.3.2.1. Importancia

Para el caso de calabacita italiana se siembran 7 mil ha, por ciclo agrícola, con un rendimiento promedio de 13.5 T.ha⁻¹. Los principales estados productores son; Puebla, Guanajuato, Sinaloa, Yucatán y Guerrero.

Para variedades mejoradas como Huracán y Terminator, se siembran 22 mil ha, por ciclo agrícola, utilizando tecnología de alta producción y obteniendo rendimientos de 15 T.ha⁻¹. Destacando los estados de Sinaloa, Sonora, Puebla, Hidalgo, Morelos y Jalisco.

En lo que respecta a la calabacita criolla se siembran 600 ha, por ciclo agrícola, destacando los estados de Jalisco y Puebla. Y se tiene un rendimiento de 12.1 T.ha⁻¹. Para la calabacita orgánica, los estados productores son Baja California Sur (Los Cabos) y el Estado de México, obteniendo rendimientos de 12.5 T.ha⁻¹.

En el rubro de calabacita para semilla el único estado productor es Baja California con 2 hectáreas y un rendimiento de .450 T.ha⁻¹.

La calabacita baby solo se produce en el centro del país. Toda la producción es para exportación, bajo contrato previo utilizando híbridos específicos.

4.3.2.2. Descripción botánica

Es una planta de ciclo vegetativo anual, de crecimiento rastrero o arbustivo.

4.3.2.3. Raíz

El sistema radical de todas las especies cultivadas de *Cucúrbita* es extensivo y profundo. Weaber y Brunner (1927) señala que después de la germinación de la semilla, la planta rápidamente forma una raíz fuerte que puede penetrar hasta 20 cm. en el suelo.

El sistema radicular es típico o pivotante, con raíces secundarias cubiertas por finos pelos absorbentes. La raíz principal llega hasta una profundidad de 2 m. Las raíces laterales y sus ramificaciones en la capa del suelo a una profundidad de no más de 60 cm. Las principales raíces laterales (de 5 a 6 mm. de grosor) llegan a una distancia de 4.5 m. de la raíz principal y sobre ellas se forman múltiples ramificaciones, algunas de las cuales alcanzan 60-120 cm. De largo.

4.3.2.4. Tallo

Todas las especies de *Cucúrbita* tienen una morfología similar en cuanto al tallo, el cual, es rastrero, espinoso y anguloso, pudiendo alcanzar una longitud de 12 a 15 m., a excepción a esta característica morfológica se encuentra en algunas variedades de *C. pepo*, conocidas como calabazas de mata, que presentan tallos pequeños y semierectos con entrenudos cortos. Todas las variedades de calabazas tienen la facilidad de formar raíces adventicias en los nudos del tallo, lo cual fortalece el sistema radical y le proporciona mayor resistencia de las plantas al viento.

4.3.2.5. Hoja

Las especies cultivadas de *Cucúrbita* tienen hojas simples con 3 o 5 lóbulos que varían en su tamaño con pedúnculos largos y huecos. Son alternas con peciolo larga y huecos, rígidas, anchas, son de color verde, más oscuras en el haz que en el envés y están recubiertas como el tallo de pelos rígidos. La nervadura es palmeada. En comparación con las demás plantas hortícolas, la calabaza forma un sistema de hojas más desarrollado y de mayor capacidad de transpiración (Guencov, 1974). Presentan manchas blanquecinas que permiten reflejar el calor cuando se encuentra expuesta a altas temperaturas.

4.3.2.6. Zarcillos

Se originan en las axilas de las hojas y generalmente se presentan ramificados (Guencov, 1974).

4.3.2.7. Flores

La calabacita es una planta monoica, las flores son unisexuales o hermafroditas, las masculinas con pedúnculos largos y finos, los cuales son cortos y gruesos en las femeninas, las flores se encuentran en las axilas de las hojas, son solitarias, de un tamaño grande y color amarillo brillante, tanto en las flores femeninas como en las masculinas, el tubo calicinal es acampanado y con cinco divisiones carnosas, las corolas son simpétalas, acampanulada, abierta con cinco lóbulos. En las flores femeninas hay un ovario ínfero, tricarpelar, trilocular y con muchos óvulos sobre tres placentas parietales que se juntan en el centro del ovario formando una masa carnosa, el estilo corto y grueso, termina en un estigma de tres divisiones bifurcadas.

Sus flores son gamopétalas con corola tubular, campanuladas, muy vistosa de color amarillo pálido a amarillo-anaranjado brillante. Las flores masculinas o estaminadas presentan estambres estructurados en una columna, donde los filamentos son libres, más o menos coherentes y las anteras se hallan soldadas formando una estructura cilíndrica o angostamente piramidal. Las flores femeninas o postiladas, presentan un ovario ínfero con numerosos óvulos en posición

horizontal. Los estilos están fusionados en toda su longitud o sólo son cortamente libres en el ápice. Los estigmas son grandes, carnosos y más o menos lobulados, observándose ligeras modificaciones en cuanto a la estructura del perianto respecto a las estaminadas, principalmente corresponden a diferencias del tamaño de alguna o algunas de sus partes, el receptáculo es siempre mucho más reducido (Lira, 1995).

Las flores de las cucúrbitas abren muy temprano por la mañana y son polinizadas por especies de abejas de géneros *Peponapis* y *Xenoglossas* y *Aphis* (Hurd y Linsley, 1964, 1967 1970; Hurt, et al., Lira, 1995).

4.3.2.8. Fruto

Es una baya o pepónide.

Las especies cultivadas de *cucúrbita* presentan mucha variación en la forma, tamaño, color y textura del fruto; mientras que en las silvestres son relativamente uniformes en cuanto a su forma (globosa, ovoides, o piriformes), superficie generalmente lisa o sin ornamentaciones; de coloración blanca, amarillenta o verde con o sin manchas y/o franjas. La cáscara delgada y suave a engrosada, rígida y lisa (Guencov, 1974, Lira 1995).

La pulpa (pericarpio) es suave y granulosa a fibrosa, de color blanco, amarillo pálido, anaranjado brillante, de sabor dulce o agradable a fuertemente amargo.

La calabacita gray Zucchini: tarda 60 días a cosecha, el fruto es cilíndrico, Consistente, longitud de 14 – 16 cm. Color verde-gris cremosos con finas marcas verde-oscuro (Jiménez y Herrera, 1991)

4.3.2.9. Pedúnculo

La forma del pedúnculo varía según las especies, pero básicamente consta de 5 aristas de forma ligeramente redondeada en el punto de inserción del fruto. Esta es la característica más importante en el reconocimiento de distintas especies. En la especie *C. maxima*, es cilíndrico y sin aristas; en *C. pepo* tiene forma de prisma

corto de 5 aristas; en *C. moschata* el pedúnculo es delgado de 5 aristas y notoriamente ensanchado en su base; en *C. argyrosperma* es de forma frecuentemente muy engrosado y corchoso, tornándose cilíndrico, claviforme o subgloboso; aunque también hay subespecies de pedúnculo delgado de cinco aristas (Lira, 1995).

4.3.2.10. Semilla

Las semillas de las especies cultivadas varían en tamaño, forma y color, siendo generalmente deprimidas, *elípticas*, ovado lanceoladas, tumescentes o infladas, el centro de la semilla es liso o algunas veces escarificadas o cicatrizadas, de color blanco, crema, azul-grisáceo-verdoso o negro, con o sin los márgenes resaltados, de diferente color. La capacidad de germinación se conserva durante 5-8 años en condiciones favorables (Guencov, 1974).

4.3.2.11. Requerimientos ambientales

4.3.2.11.1. Temperatura

La calabacita es una planta que exige calor, no obstante se desarrolla bien en climas templados. De acuerdo a Valdez (1990) la calabacita prospera bien en climas cálidos con temperaturas máximas de 32 °C, mínimas de 10 °C y un rango óptimo que oscila de 18 a 25 °C.

En esta etapa de crecimiento la planta debe de quedar establecida en el periodo libre de heladas (Maroto, 1990).

A temperaturas altas (35°C) y días largo con alta iluminación tienden a formar más flores masculinas y con bajas temperaturas y días más cortos hay mayor formación de flores femeninas. También con temperaturas nocturnas inferiores a 12°C el polen no madura (Villaseñor, 1981), a temperaturas bajas (menores a 10°C) y altas (mayores a 32°C) diurnas, la actividad polinizadora de los insectos baja, por lo que la polinización es deficiente.

4.3.2.11.2. Luz

Se ha comprobado que días largos con alta luminosidad tienden a formar más flores masculinas y con temperaturas frescas y días cortos hay mayor formación de flores femeninas. Este cultivo necesita de la intensidad de luz siempre y cuando no altere los límites normales de la temperatura (Guenkov, 1974).

4.3.2.11.3. Humedad

Al presentarse condiciones de sequía se afecta al rendimiento y calidad del fruto, por ello la humedad del suelo debe ser alta durante el desarrollo, floración y fructificación del cultivo, con un 20 a 40 % de humedad del suelo la calabacita se desarrolla bien (Tamaro, 1981).

4.3.2.11.4. Suelo

La calabacita se desarrolla mejor con la humedad normal del suelo (70% de CC.). Prospera en cualquiera tipo de suelos, aunque prefieren los ricos en materia orgánica (3 al 5%) y profundos (> de 50 cm) para la mejor distribución del agua de riego y con un PH de 6.0 al 7.5 (Bautista, 1983).y en cuanto a salinidad tolera valores de 3840 a 2560 ppm (6 a 4 mmhos) (Castaños, 2000).

Los suelos deben ser profundos con subsuelo permeable, de buena estructura, fértiles, aluviales a arcillo-arenosos. Los suelos pesados no son favorables por su poca aireación y los ligeros por su balance de humedad. Se recomienda fertilizar después del cultivo por agotamiento del suelo. (Tamaro, 1981).

4.3.3. Cebolla (*Allium cepa*)

4.3.3.1. Importancia

En México la cebolla para el año 2009 ocupó el tercer lugar en superficie cultivada después del chile verde (*Capsicum annum*) y tomate rojo (*Lycopersicon esculentum*) mientras que para el año 2008 se posiciona en el quinto lugar. En el año 2007 se establecieron 34,338 ha y se obtuvo una producción de 1,032,314 t,

en comparación con 1999 la superficie cultivada fue de 53,369.610 ha, con una producción de 1,226,989 t.

A nivel mundial se producen de cebolla casi 28 millones de t anuales. La cebolla se produce desde las regiones sub árticas del norte de Finlandia hasta los trópicos húmedos, aunque están mejor adaptadas a la producción en las regiones subtropicales y en las áreas templadas. Los bulbos de cebolla se almacenan y transportan fácilmente en todo el mundo, existiendo un comercio internacional de aproximadamente 2 millones de toneladas anuales, equivalente a unos 400 millones de dólares americanos.

Los países donde se cultiva la cebolla a gran escala son la India, Indonesia, EU, Turquía, Japón, Egipto, España, Italia, Corea y Filipinas. Ellos aportan entre 2.5 y 6.7% del valor monetario de la totalidad de su mercado hortícola. En Egipto ese porcentaje logra llegar al 21%. En América Latina figuran como países productores Brasil, Argentina, Ecuador y principalmente México. En la producción mundial de hortalizas, esta especie ocupa el quinto lugar en cuanto a volumen producido y el tercer lugar como hortaliza de exportación siendo los países que más exportan México, Nueva Zelanda, Francia, Indonesia y Países Bajos.

Se estima que del total de la producción en nuestro país, el 15 % de esta se exporta, lo cual coloca a México como el cuanto exportador a nivel mundial. Las mayores superficies fueron destinadas por México, Japón, Turquía y Corea del Sur con el 17,13%, y los dos últimos con el 11% respectivamente.

4.3.3.2. Descripción botánica

4.3.3.3. Sistema radical

Es de origen caulógeno o adventicio ya que la raíz verdadera desaparece en la primera etapa. Las adventicias, entonces se originan del tallo adquiriendo la forma fibrosa o fasciculada y desenvolviéndose de manera subterránea. Las raíces generada son simples y su número aumentada gradualmente hasta el fin del periodo vegetativo. La mayoría de las raíces (60-70) presentan pocos pelos absorbentes. Además, se sitúan a una profundidad entre 5 y 40 cm, pero horizontalmente pueden alcanzar 15 cm y hasta 25 ó 30 cm (Garza, 1985).

4.3.3.4. Tallo verdadero.

Es de carácter hipogeo, posición erecta, consistencia herbácea y carnosa y con duración anual, osea, muere al finalizar el periodo vegetativo de la planta. El tallo verdadero se constituye en el plato o disco o base del bulbo con la longitud de 0.5 cm y un diámetro de 1.5 a 2.0 cm (Garza, 1985).

4.3.3.5. Falso tallo

La porción conocida como falso tallo se constituye por un conjunto de vainas cilíndricas que forman parte del follaje de la planta. Cuando una nueva hoja es generada ésta pasa por la vaina de la hoja próxima anterior de manera tal que las vainas quedan una dentro de otra y así sucesivamente hasta constituir entre ellas el falso tallo; el cual por lo general, presenta en casi todo el periodo vegetativo una posición erecta. Con la vernalización de las yemas exiliares, la planta estará en condición de emitir y dar lugar al crecimiento del tallo floral (garza, 1985).

4.3.3.6. Tallo floral

El tallo floral, generalmente, es de color verde, posición erguida, de consistencia herbácea, liso ahuecado y con la porción del tercio inferior ensanchada; por lo común esta parte de la planta sobresale al follaje llegando a alcanzar una altura de 0.6 a 1.5 m (Garza, 1985).

4.3.3.7. Hojas

Las hojas de 10 a 15 se generan a partir del tallo verdadero. El limbo es simple, glauco, tubular, hueco, aguzado por el extremo superior y ensanchado en la porción media inferior, de color verde a verde claro, con o sin la presencia de una película parecida a la cera, de nervaduras paralelas. La vaina es cilíndrica y formadora de catáfilas o escamas de consistencia carnosa e hinchada pudiendo ser éstas abiertas o cerradas. Las escamas abiertas se forman en el periodo vegetativo a partir del engrosamiento de la porción inferior de las vainas y darán lugar a las túnicas que envolverán al bulbo; las escamas cerradas son carnosas, y se forman a partir de vainas enteras de hojas que no han formado limbo y envuelven a la yema(s) generada (s) sobre la base del bulbo, lo cual ocurre generalmente después de formada la sexta hoja de la planta. Estas últimas tienen funciones de reserva de material nutritivo para los brotes.

En lo general, la disposición de las hojas es alterna y dispuesta en dos filas (Garza, 1985).

4.3.3.8. Fruto

El fruto se constituye por una cápsula tricarpetal de forma obtusa triangular (Garza, 1985), en la que se pueden formar hasta 6 semillas. En las fases tempranas la cápsula es de color verde-pardo. Cuando las semillas alcanzan el inicio de la maduración, caracterizada por un color como cera, se ponen de color verde amarillento, y la plena madurez, pardo-claro. En este último estado, las cápsulas se rompen y las semillas se esparcen. Este proceso no se realiza al mismo tiempo en todas las cápsulas porque el desarrollo de las flores, su floración y, posteriormente, la maduración, se realiza durante un periodo bastante largo (Guenkov, 1974).

4.3.3.9. Requerimientos ambientales

4.3.3.9.1. Temperatura

Las temperaturas diurnas óptimas para el almacigo fluctúan entre 16 y 18°C, la temperatura nocturna fluctúa entre 13 y 16 °C como óptima. La temperatura máxima del suelo para promover la germinación es de 35°C y la mínima es de 1°C, con una óptima de 24°C y una fluctuación entre 10 y 35°C. Estas temperaturas pueden ser variables de acuerdo a las variedades.

La cebolla es resistente a heladas blancas pero no a las heladas negras. Además en este cultivo si no existe vernalización y no hay escape floral y brotación de yemas.

4.3.3.9.2. Radiación

La planta responde a fotoperiodos de día corto, intermedio y largo: Día corto de 11 a 12 hr. Estas cebollas son las más sembradas en México, principalmente en el centro (en la zona del bajío y el Estado de Morelos y Puebla (Libres, Puebla). Día medio 12 a 13 hr. Estas cebollas se cultivan principalmente en el Estado de Chihuahua, Guanajuato (P-V) y Ensenada B.C. Día largo 14 a más horas este tipo de cebollas solo se siembran en Chihuahua y B.C. (Castaños, 2000).

4.3.3.9.3. Suelo

Este cultivo prefiere suelos ricos en materia orgánica, ligeros o arenosos, limosos y francos arenosos. La cebolla está clasificada como ligeramente tolerante a la acidez, con un pH de 6.0 – 6.8, no tolera suelos salinos. Suelos medianamente pesados son preferibles, debido a que son más fríos, tienen alta capacidad de retención de humedad y más productivos. Aunque algunas veces los suelos pesados no dejan pasar el agua lo cual puede ocasionar que el agua y el aire no estén al alcance de la raíz y provocando la muerte de estas.

En el estado de Guanajuato se siembra principalmente en suelos de tipo Vertisoles, lo que provoca la deformación de bulbos y bulbos con alta humedad en el momento de la cosecha, lo que puede presentar un problema al momento del almacenaje.

4.3.4. LECHUGA (*Lactuca sativa*, L.)

4.3.4.1. Importancia

La lechuga es el cultivo más importante para el mercado en fresco en los EUA en términos de peso, producción y valor de mercado. La mayoría de las lechugas son del tipo Crisphead, Existen otros 5 tipos de lechuga: de Cos o romana, Butterhead y lechuga de hoja las cuales están ampliamente extendidas en los EUA; lechuga latina, un tipo del mediterráneo o Sudamérica; y lechuga de tallo, la cual crece en el Oriente y Egipto. Cerca del 90 % de la producción comercial de EUA es del tipo Crisphead, el resto es de Cos, Butterhead y de hoja.

4.3.4.2. Descripción Botánica

4.3.4.3. Raíz

El sistema radical de la lechuga es de origen seminal y del tipo columnar pivotante con ramificaciones secundarias y muy numerosas que se desenvuelven de manera subterránea. La raíz principal, al no encontrarse con barrera física, puede llegar a profundizar hasta 1.2 m; sin embargo, es común que éstas y las raíces secundarias se desarrollen en los primeros 20-30 cm de la capa del suelo. Las raíces secundarias en las primeras etapas, tienden a un crecimiento lateral alcanzado los 15 a 20 cm de longitud para después dirigirse en sentido vertical (Garza, 1985).

4.3.4.4. Tallo

El tallo es epigeo de consistencia herbácea, erguido, alcanzando, comúnmente, una longitud entre 10-15 cm (Garza, 1985). En las primeras etapas el tallo crece muy lentamente y no ramifica; gracias a esta peculiaridad biológica se forman la roseta de hojas y los repollos (lechugas de repollo y lechuga romana). No obstante, después de rebosado el estadio de vernalización e iluminación, se alargará rápidamente (60-120 cm), se ramifica y cada ramilla termina en una inflorescencia (Guenkov, 1974).

4.3.4.5. Hojas

Las hojas son de limbos simples, con borde entero, liso, crespo o lobulado, de lámina orbicular, oblonga o espatulada, de color verde pálido obscuro; se disponen alternamente alrededor del tallo formándose una roseta tendiendo a ser abrazadoras las más jóvenes. En particular, la variedad crespa o de hoja suelta presenta hojas basales anchas, crespas o de márgenes recordados, no repolladoras; la variedad Capitata o de cabeza presenta hojas basales anchas, enteras o algo lobuladas, redondeadas, poco erguidas y formando una cabeza esférica o anchatada. En la etapa reproductiva, las hojas que surgen presentan limbos sagitados o auriculados siendo de tamaño más pequeño aquéllos localizadas hacia arriba (Garza, 1985).

4.3.4.6. Fruto

El Fruto lo constituye un aquenio obovado, achatado y más ancho hacia la Proción apical y acostillado (3 a 5) en sus caras. Es de color castaño amarillento o casi negro (Garza, 1985).

4.3.4.7. Semilla

Las semillas son deprimidas, alargada, más notablemente aguzadas del lado del hilo que del lado del ápice. En algunas de las variedades las semillas son de color blanco plateado y, en otras desde pardo claro hasta castaño obscuro, con finas aristas a lo largo. Las semillas maduran comúnmente a las 12-15 días de la floración.

Las semillas recién recogidas, muchas veces no germinan normalmente a causa de la necesidad de una maduración adicional después de la recogida o de una sensibilidad mayor a las temperaturas altas. El peso absoluto de las semillas de lechuga es de 0.8-1.2 g (830-1250 sem/g) (Guenkov,1974).

4.3.4.8. Requerimientos ambientales

4.3.4.8.1. Temperatura

El ambiente idóneo para la producción comercial de lechuga debe ser fresco, es decir, con temperaturas que oscilen entre los 7° a los 24°C y con baja humedad relativa, puesto que los altos niveles de este factor propician el desarrollo del Mildiu, enfermedad fungosa de gran importancia económica en el cultivo.

El efecto de las altas temperaturas (>26°C) sobre el cultivo de la lechuga es la acumulación de látex amargo en la nervaduras y cuando esto ocurre por varios días se desarrolla el vástago floral, perdiendo su valor comercial.

La lechuga de forma general se le considera como una planta de día largo, en tales condiciones muchas de las variedades forman un tallo floral con mayor rapidez, esto se facilita por una combinación entre día largo y altas temperaturas.

4.3.4.8.2. Suelo

La lechuga se adapta a varios tipos de suelo, sin embargo los mejores para su cultivo son los arcillo-arenosos (Castaños, 2000).

4.3.4.8.3. Humedad

El cultivo requiere de una gran cantidad de agua durante las etapas intermedias de desarrollo.

4.3.5. Brócoli (*Brassica oleracea* L. italica)

4.3.5.1. Importancia

El brócoli (*Brassica oleracea* L.) es una hortaliza de importancia económica a nivel mundial debido a sus valores alimenticios y medicinales. Tanto las hojas como la inflorescencia (florete) tienen alto valor nutricional por sus contenidos de proteínas, carbohidratos, fibra, calcio y hierro, entre otros (Yanaguchi, 1983).

En México se sembraron 20 mil 184 hectáreas durante el 2007; los principales estados productores, en orden de importancia, son: Guanajuato (con más de 50 % de la superficie sembrada), Puebla y Michoacán; en estos estados se tienen una gran cantidad de empacadoras y congeladoras que permiten el envío a otros países de América, Europa y Asia.

En México los principales estados productores de brócoli son Guanajuato, Michoacán, Puebla y Jalisco, con 13 mil 337, 2 mil 509, 1350 y 1248 ha, respectivamente, y con rendimientos que oscilan entre las 11 y 21 T.ha⁻¹.

4.3.5.2. Descripción botánica

Es una planta similar a la coliflor, aunque las hojas son más estrechas y más erguidas, con peciolo generalmente desnudos, limbos normalmente con los bordes más ondulados; así como nervaduras más marcadas y blancas; pellas claras o ligeramente menores de tamaño, superficie más granulada, y constituyendo conglomerados parciales más o menos cónicos que suelen terminar en este tipo de formación en el ápice, en bastantes casos muy marcada.

4.3.5.3. Hoja

Las hojas del brócoli poseen pecíolos alargados, limbos con hojas lobuladas de color verde grisáceo, muy ondulados y con lóbulos profundos.

4.3.5.4. Flores

Las flores son pequeñas, en forma de cruz y cuando maduran, presentan cuatro pétalos amarillos.

4.3.5.5. Frutos

Los frutos en silicua con semillas de redondeados de color rosáceo.

4.3.5.6. Requerimientos ambientales

4.3.5.6.1. Temperatura

El brócoli es una hortaliza que se desarrolla favorablemente en climas fríos y frescos, tolerando temperaturas de hasta -2 °C, siempre y cuando no esté presente la inflorescencia en la planta, de lo contrario será fácilmente dañada por la baja de temperatura. La temperatura óptima de desarrollo es de 17 °C.

4.3.5.6.2. Suelo

Se adapta casi a cualquier tipo de suelo, pero, como todos los vegetales, prefiere suelos no muy ligeros, uniformes, profundos con buen drenaje y con un pH óptimo de 6 a 7.5 (aunque soporta de 5 a 5.5 de pH).

4.4. Uso de los sistemas de información geográfica en zonificaciones agroecológicas

Es importante mencionar que aunque la metodología de zonificación agroecológica (ZAE) propuesta por la FAO (1978) no se diseñó para generarla con sistemas de cómputo, ésta se puede implementar mediante el uso de software especializado, debido a que para su determinación es necesario sobreponer diversas capas de información espacial, con la finalidad de definir zonas con cierto nivel de aptitud.

Los SIG's se definen como un conjunto de hardware, software, personas y procedimientos diseñados para soportar la captura, el manejo, la manipulación, el análisis, el modelaje y el despliegue de datos estadísticos, espaciales y temporales para la solución de problemas complejos del manejo y uso de la tierra. El objetivo principal de un SIG es obtener resultados confiables para la toma de decisiones a través del análisis e interpretación de gran cantidad de datos biofísicos, socioeconómicos, estadísticos en forma espacial y temporal, necesarios para generar de una forma flexible, versátil e integrada productos de información

tales como tablas y mapas (FAO, 1997; Fernández y Sumano, 1992; Nozica *et al.*, 1997).

La principal utilidad de un SIG radica en su capacidad para construir modelos o representaciones del mundo real, a partir de una base de datos digital. Los modelos constituyen un instrumento eficaz para analizar y determinar los factores que influyen en las tendencias, así como en la evaluación de las posibles consecuencias en las decisiones de planificación sobre los recursos existentes en un área de interés (Carmona y Monsalve, 2000).

Aunque el uso de los SIG's para la generación de zonificaciones agroecológicas se ha intensificado en los últimos años, aun son mínimas las investigaciones que se apoyan en ese tipo de sistemas. Dentro de éstas, se pueden citar los trabajos realizados por Carbonell *et al.* (2001); Díaz *et al.* (2000); Ruiz (1998) y Villa *et al.* (2001).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización

La zona de estudio se localiza al noroeste del estado de Michoacán, entre las coordenadas $19^{\circ} 53'$ y $20^{\circ} 14'$ de latitud norte y $102^{\circ} 29'$, $102^{\circ} 45'$ de longitud oeste (Figura 1) y se corresponde con el Distrito de Riego 024-Ciénega de Chápala, que comprende una superficie de 46, 171 hectáreas, equivalente al 6.11 % de la superficie del estado (Silva *et al.*, 2006).

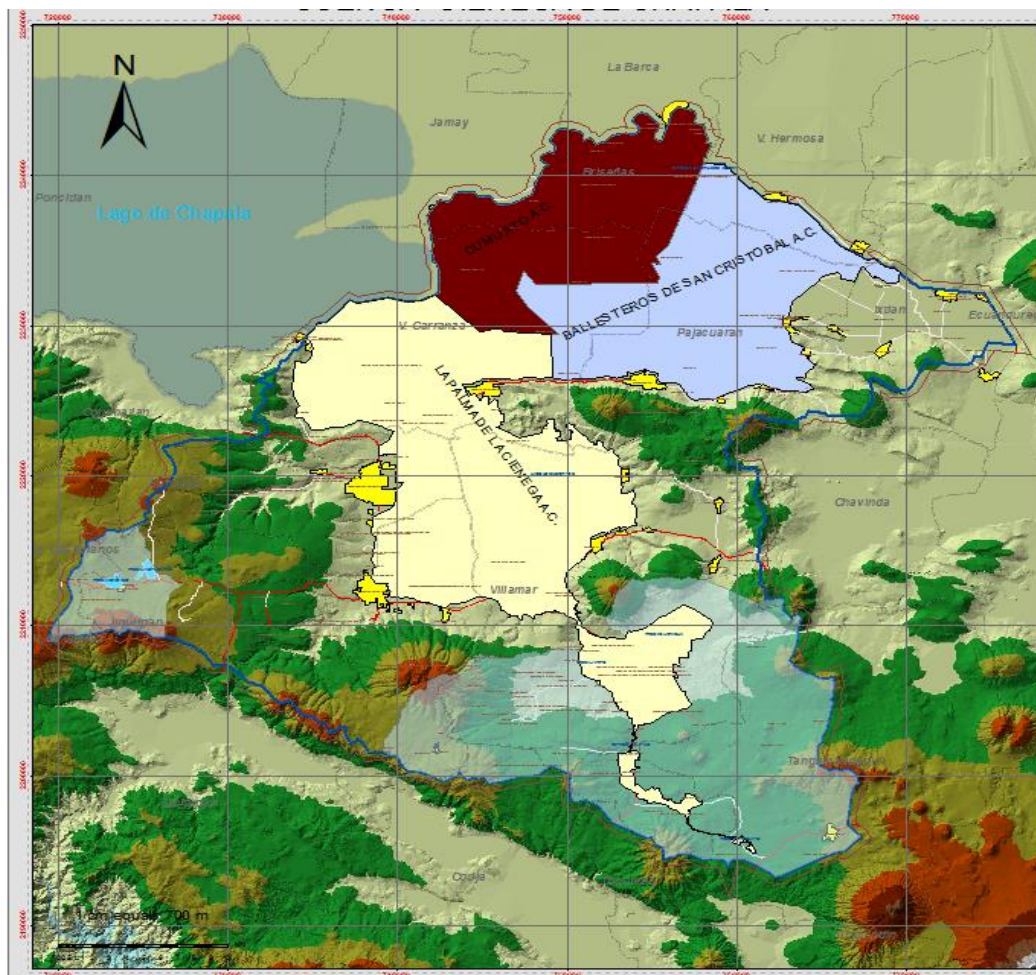


Figura 1. Esquema de localización de la Ciénega de Chapala.

La región era originalmente un humedal, pero fue desecada por el bordo de Maltaraña. La denominación de Ciénega permaneció. Se encuentra a una altitud promedio sobre el nivel del mar de 1522 m.

Comprende parte de los municipios de Jiquilpan, Sahuayo, Venustiano Carranza y Pajacuarán, en donde se ubican un total de 32 poblaciones (Figura 2).

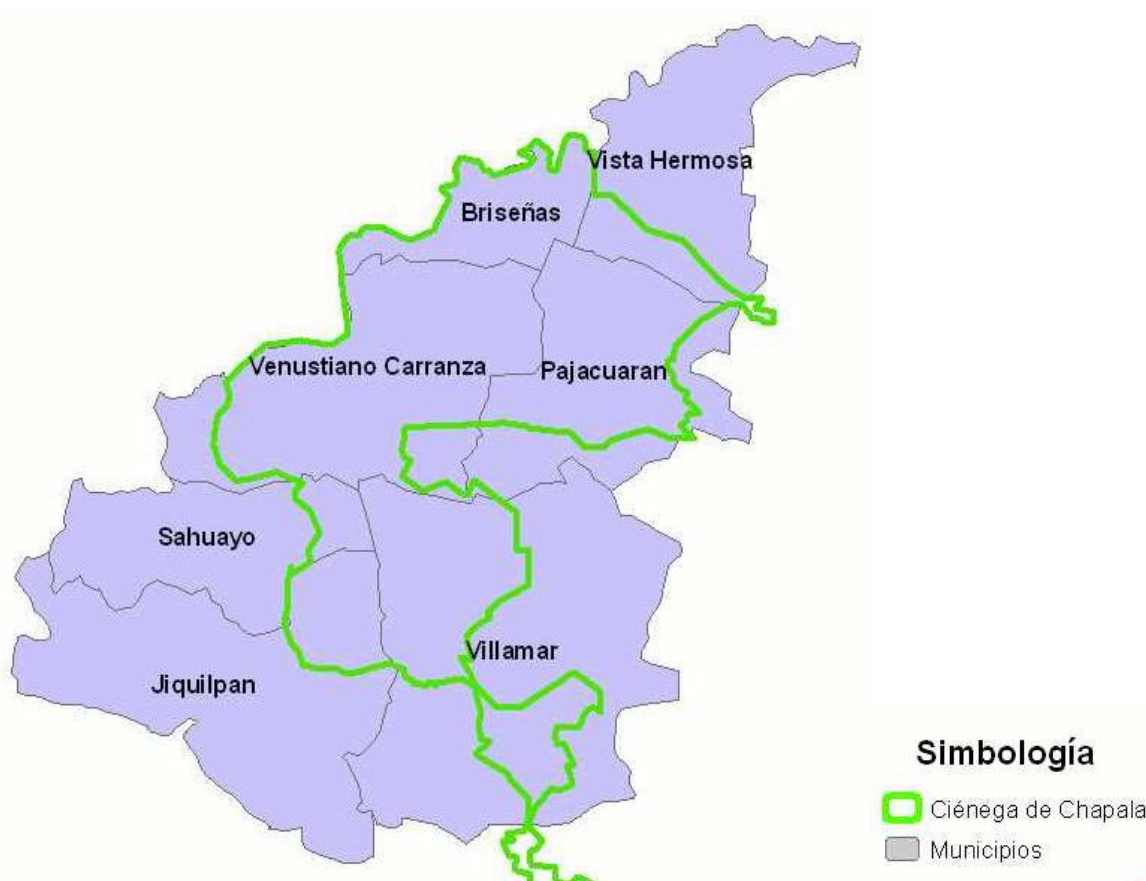


Figura 2. Localización y distribución de Distrito de riego 024-Cienega de Chapala.

Las principales vías de comunicación son: la carretera federal No 15 México-Guadalajara, en su tramo Villamar-Sahuayo, así como la carretera estatal No. 5,

en su tramo Sahuayo-La Barca; además de un sinnúmero de caminos de terracería transitables todo el año que entroncan a las vías principales y que comunican con rancherías distantes.

5.2 Clima

Según la clasificación de Köppen modificada por García (1988), los climas predominantes en el área de estudio son: (A) C (w1) y C (w1) semicalido subhúmedo y templado subhúmedo, con lluvias en verano, el primero abarca la mayor parte de la Ciénega y el segundo la zona de lomeríos (Figura 3).

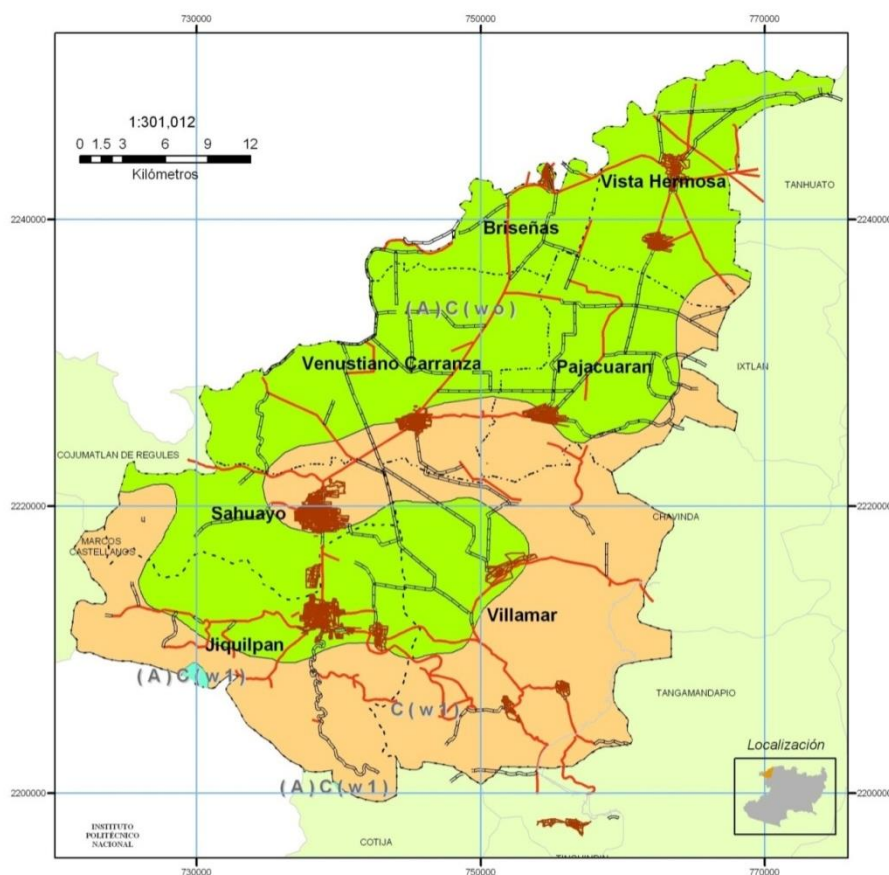


Figura 3. Mapa de clima de la Ciénega de Chapala.

La precipitación media anual es de 800 mm, con un rango de escurrimiento superficial del 10 al 20 %; siendo la temperatura promedio anual de 18 °C. En

general, la precipitación invernal es menor al 5 %; el mes de marzo registra la menor precipitación (40 mm) y julio la máxima, de 235 mm (Figura 4).

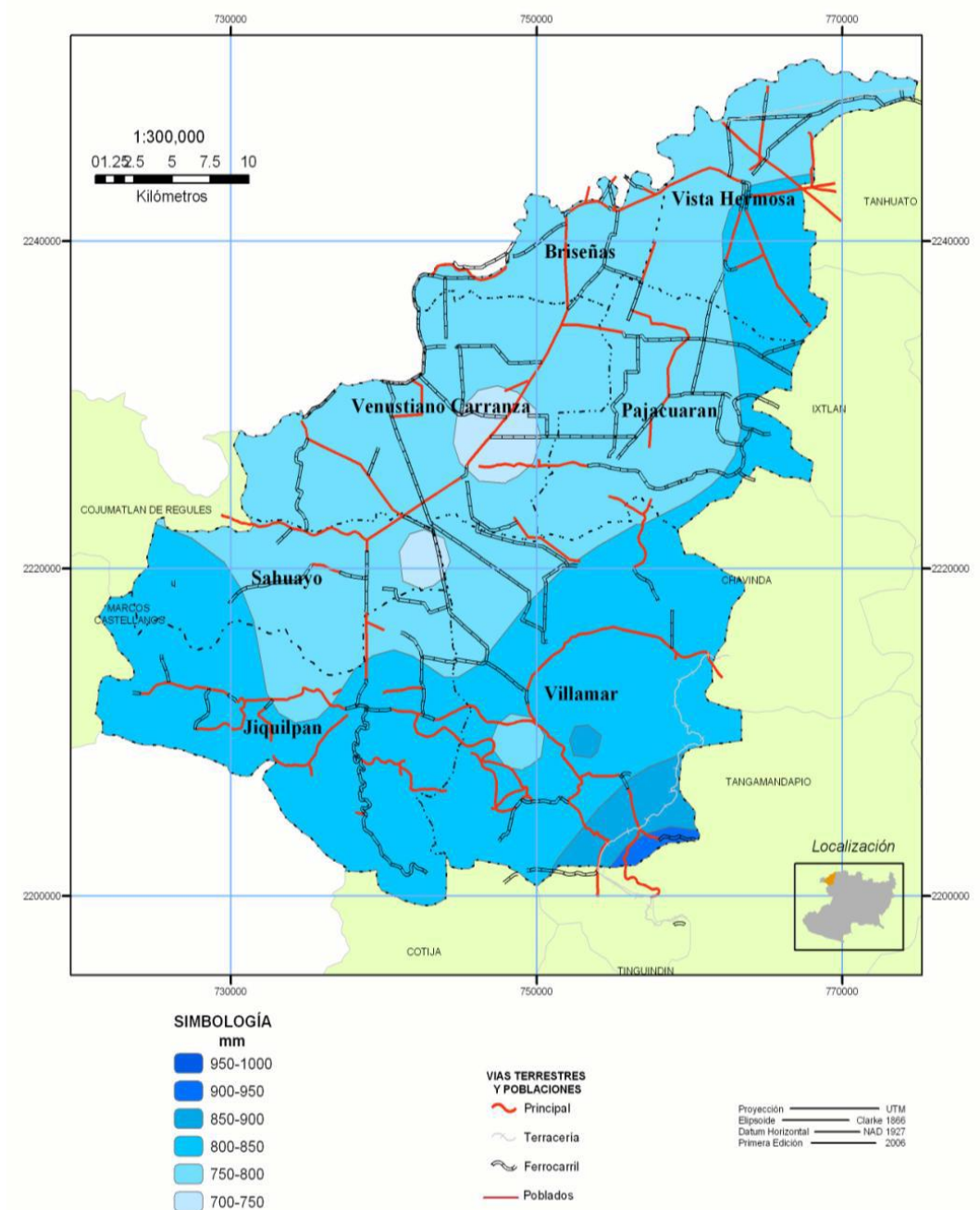


Figura 4. Isoyetas del Distrito 024-Ciénega de Chapala.

5.3. Geología

La región de estudio se localiza en el sector occidental del cinturón Volcánico Mexicano (CVM), que es uno de los arcos volcánicos más relevantes de México (Figura 5), donde la distribución de los elementos tectonovolcánicos presentan una orientación general este-oeste (Rosas, 1997).

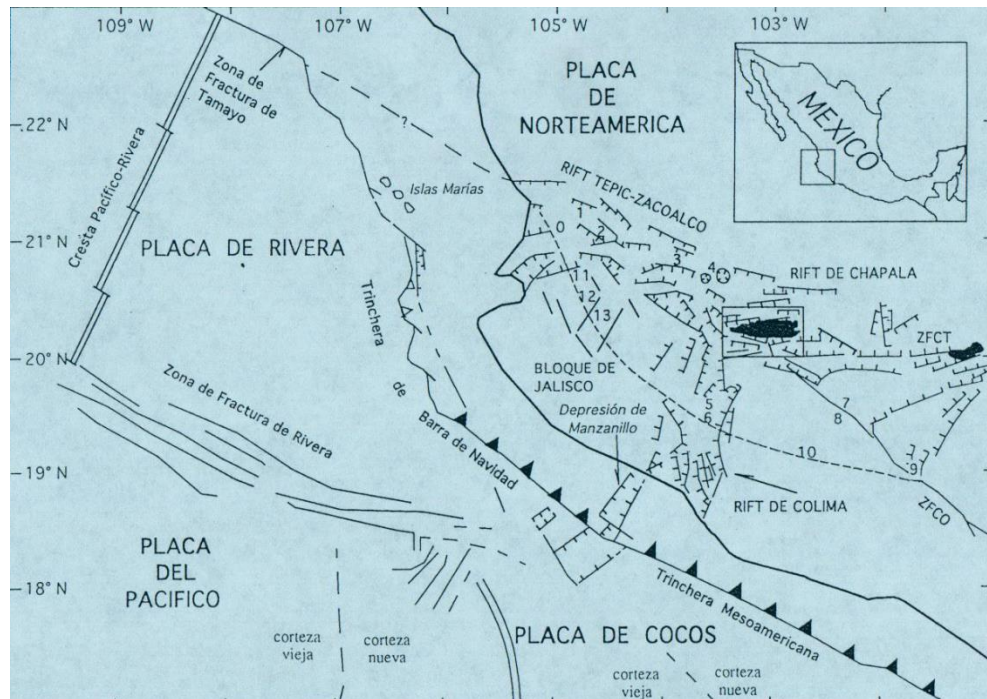


Figura 5. Marco tectónico para el occidente del CVM.

En cuanto a la litología de la región la predominancia es de rocas ígneas extrusivas básicas (basaltos), tienen alto contenido de magnesio, calcio o sodio en su composición química, es de grano fino (< 0.05 mm), su composición es de aproximadamente la mitad de piróxeno y mitad de plagioclasa, hasta un 5 % de óxido de hierro, generalmente magnetita. Debido a que tienen textura rugosa y puede haber muchos poros, esto hace que la roca sea permeable y el agua puede penetrar con facilidad y transformarla en suelo (Hall, 1987). La limolita-arenisca es

una forma endurecida de la arena, se compone de granos de cuarzo, mica y fragmentos de grano fino, cuyo tamaño varia de 60 μm a 2 mm, cementados por otros minerales, con frecuencia por el cuarzo, calcita, óxidos de hidróxidos de hierro y arcilla (Figura 6).

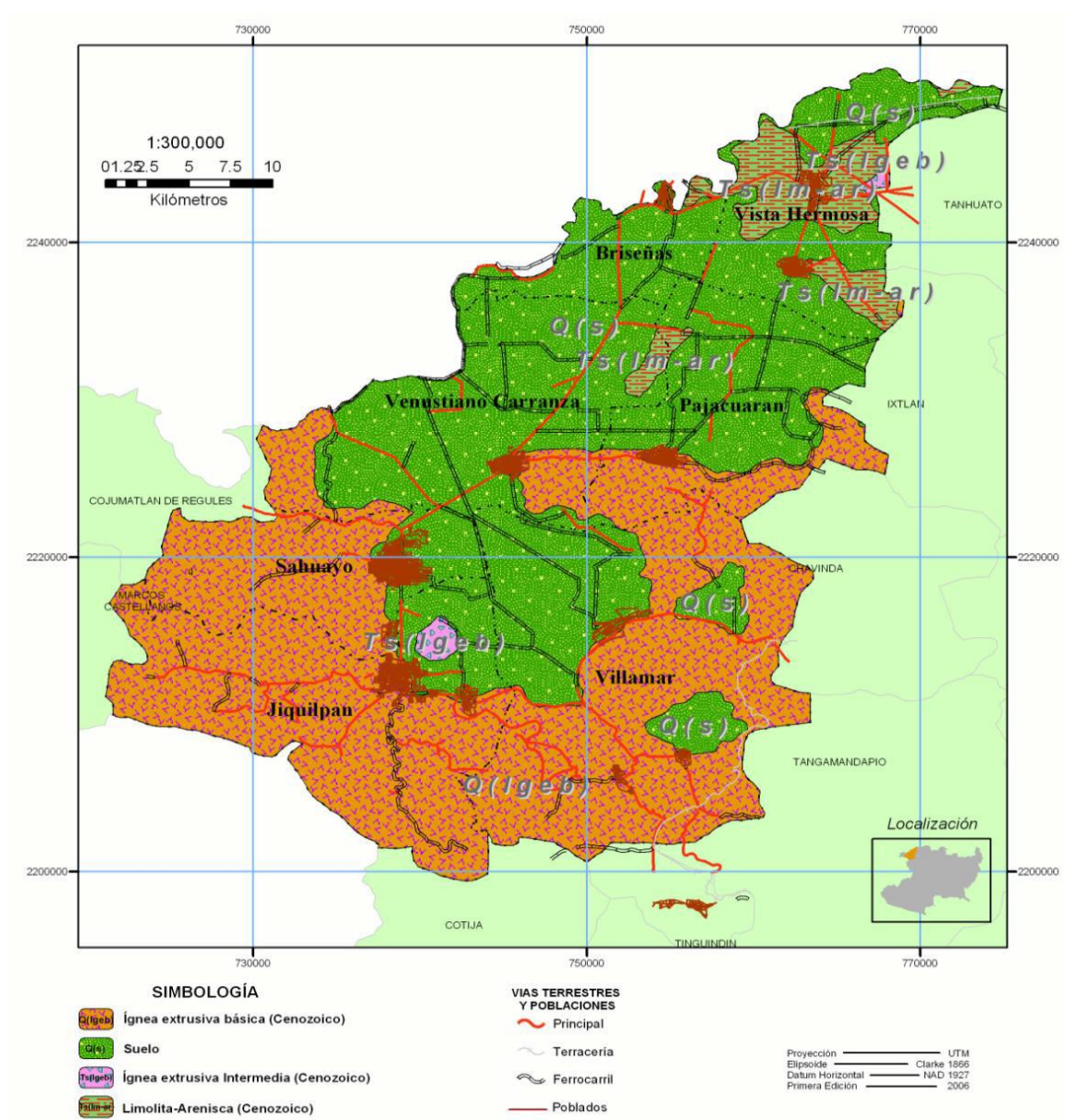


Figura 6. Geología del Distrito de riego 024 – Ciénega de Chapala.

5.4. Uso de suelo y vegetación.

La mayor parte de la superficie ya no cuenta con su vegetación original. En la actualidad se encuentra ocupada por cultivos que por lo general son (es) trigo, maíz, cebada, avena, entre otros. Solamente las zonas de lomeríos se encuentran con menos perturbación por el hombre (Figura 7, Cuadro 1).

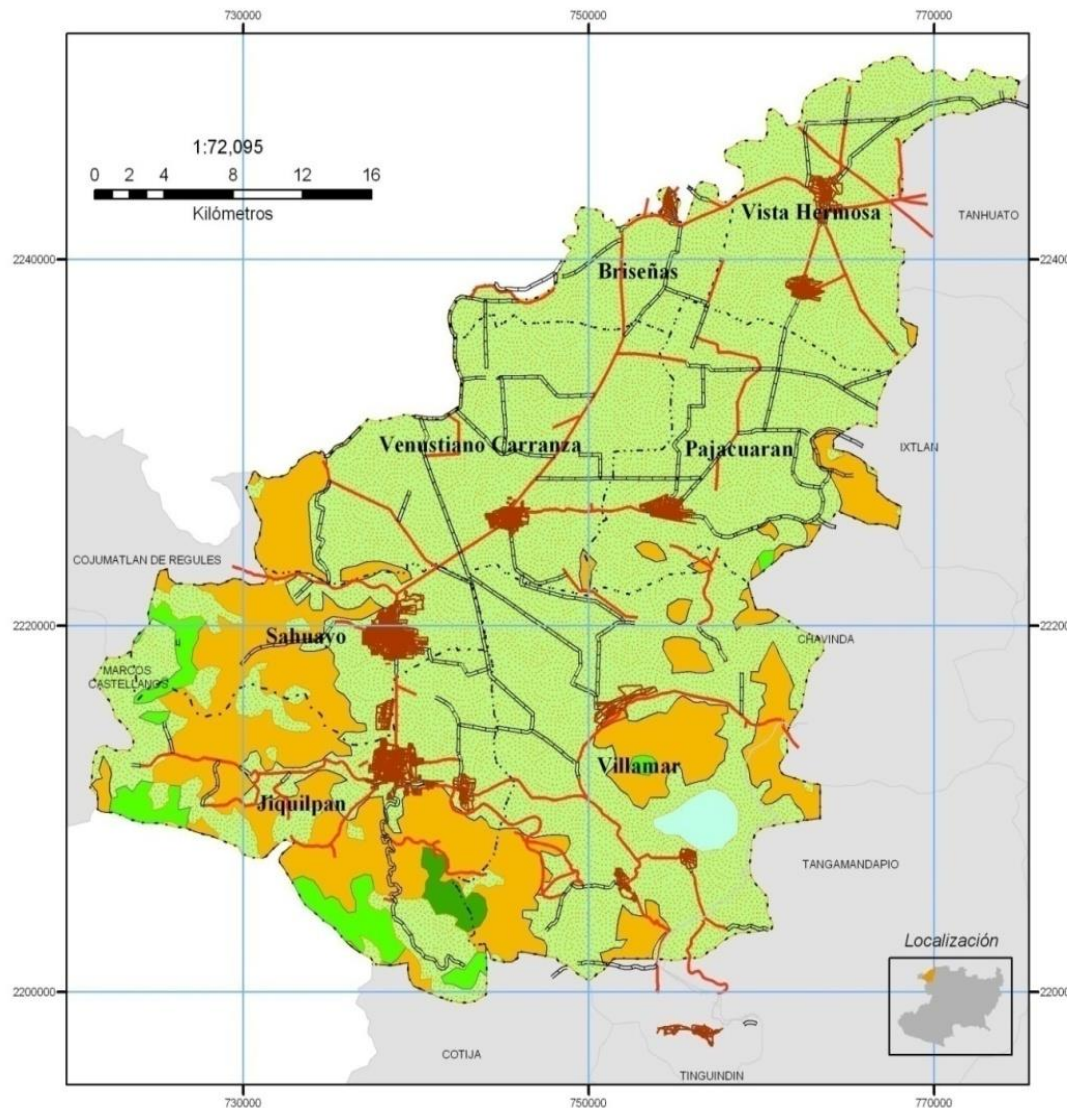


Figura 7. Mapa de uso de suelo y vegetación.

Cuadro 2. Tipos de Vegetación.

Descripción	Superficie (ha)
Bosque de coníferas distintas a <i>Pinus</i>	834
Bosque de encino	4,130
Manejo agrícola, pecuario y forestal (plantaciones)	106,144
Matorral espinoso tamaulipeco, submontano y subtropical	30,861
Vegetación halófila y gipsófila	1,071



Figura 8. Principales tipos de cultivo que se encuentran en el área de estudio.

Dentro del área de uso agrícola los principales cultivos que se encuentran en la Ciénega de Chapala son: alfalfa, maíz, sorgo, trigo, frijol y cebolla (Figura 8).

5.5. Suelos

Los suelos están íntimamente ligados con el tipo de roca que se presentan en la zona, para este caso no es la excepción, como anteriormente se mencionó la predominancia de basaltos en la zona da como origen a Vertisoles, que en el Cuadro 3 se observa son los que ocupan la mayor superficie, estos suelos son arcillosos (> 35 % de arcilla), presentan grietas que se abren y se cierran periódicamente, contiene agregados en forma de cuña y son de naturaleza alcalina. Los Luvisoles son también arcillosos como los suelos anteriores pero con la diferencia que presenta un horizonte argílico, que presenta iluviación de arcilla.

Los suelos someros que se localizan en la zona, se clasifican como Litosoles. Los suelos que se originaron a partir de sedimentos aluviales que se clasifican como Fluvisoles. Los mejores suelos de la región son los Phaozems, ya que son ricos en materia orgánica, rico en bases (> 50 PSB) y su estructura es granular (Figura 8) (Soil Survey Staff, 2006; WRB, 2006).

Cuadro 3. Superficie de suelos del área de estudio.

Descripción	Superficie (Ha)
Phaozem Háptico	4314
Phaozem Lúvico	1954
Fluvisol Calcárico	2662
Leptosol	5790
Luvisol Crómico	8537
Luvisol Vértico	4468
Vertisol Crómico	5166
Vertisol Pélico	13,280

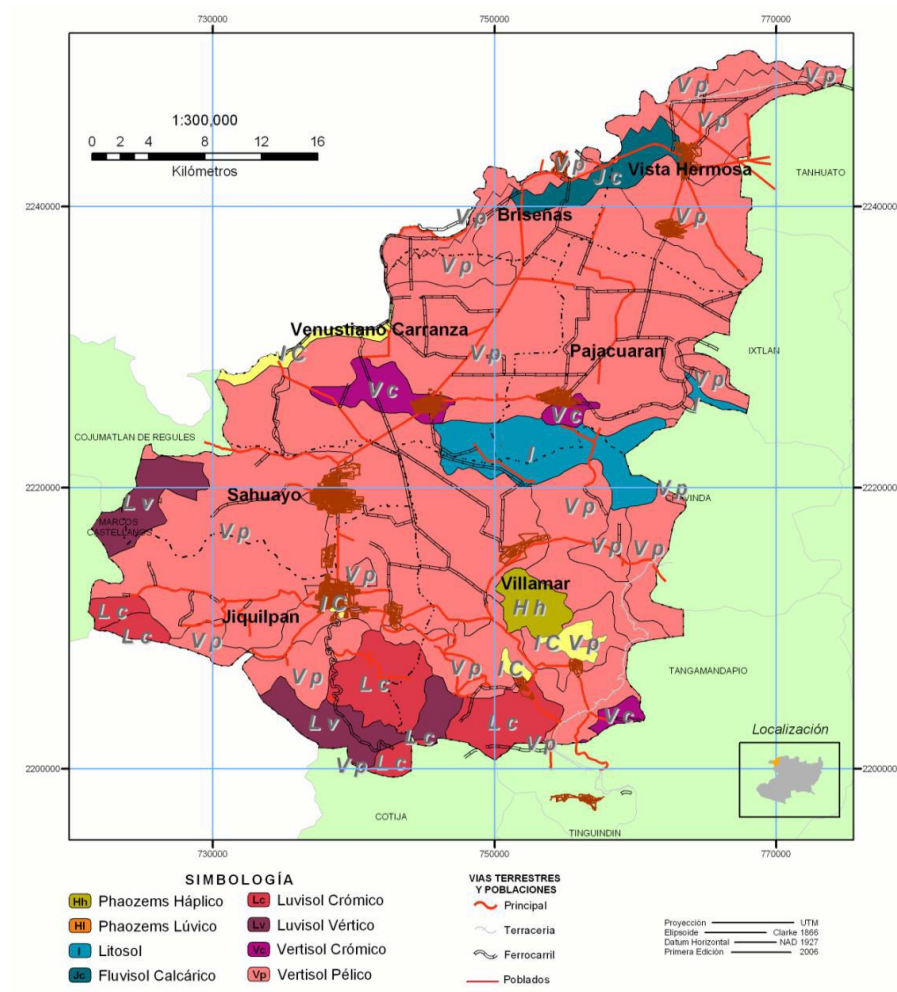


Figura 9. Edafología del Distrito de riego 024-Ciénega de Chapala.

5.6. Metodología

5.6.1. Elaboración de mapas base.

Para la elaboración de los mapas base del área de estudio se realizó un diagnóstico que permitiera tener un panorama de la situación físico-ambiental del

distrito de riego 024, la metodología estuvo en función a la información generada por la creación y análisis de mapas temáticos base: topográfico, edafológico, geológico, uso de suelo y vegetación correspondientes a las existentes en las bases de datos nacionales. El modelo digital de elevación se extraerá del continuo de elevaciones mexicano (<http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>) y el pixel se configurara a 30 m² que es la óptima (Smith *et al.*, 2006).

El material digital comprende el conjunto de datos vectoriales en formato DXF e imagen digital de las cartas topográficas. La estratificación del conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas que se emplearon en el presente estudio comprende: a) localidades y rasgos urbanos, b) vías de transporte, c) curvas de nivel, d) corrientes permanentes e intermitentes, entre otros.

El procesamiento de la información se realizó en los siguientes software: a) Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap 10, Quantum Gis 1.7.0., SAGA GIS, ILWIS 3.7.2. y c) programa **R**2.14.2 (R Development Core Team, 2008) para el manejo estadístico.

Una vez obtenido el diagnóstico físico del Distrito de riego 024, la interpretación de los mapas temáticos mencionados con anterioridad, se procedió a la designación de los puntos de muestreo.

5.7. Muestreo de suelos

5.7.1. Ubicación de los sitios de muestreo

Al tener la caracterización de los tipos y subunidades de suelo presentes en el área de interés mediante el mapa edafológico, se trazó una cuadrícula equidistante a cada 5 km y se obtuvieron 400 nodos que se tomaron como puntos de muestreo, ubicándolos mediante un GPS marca Garmin 12, se tomó 1 kg de suelo a una profundidad de 0 a 30 cm (Figura 9).

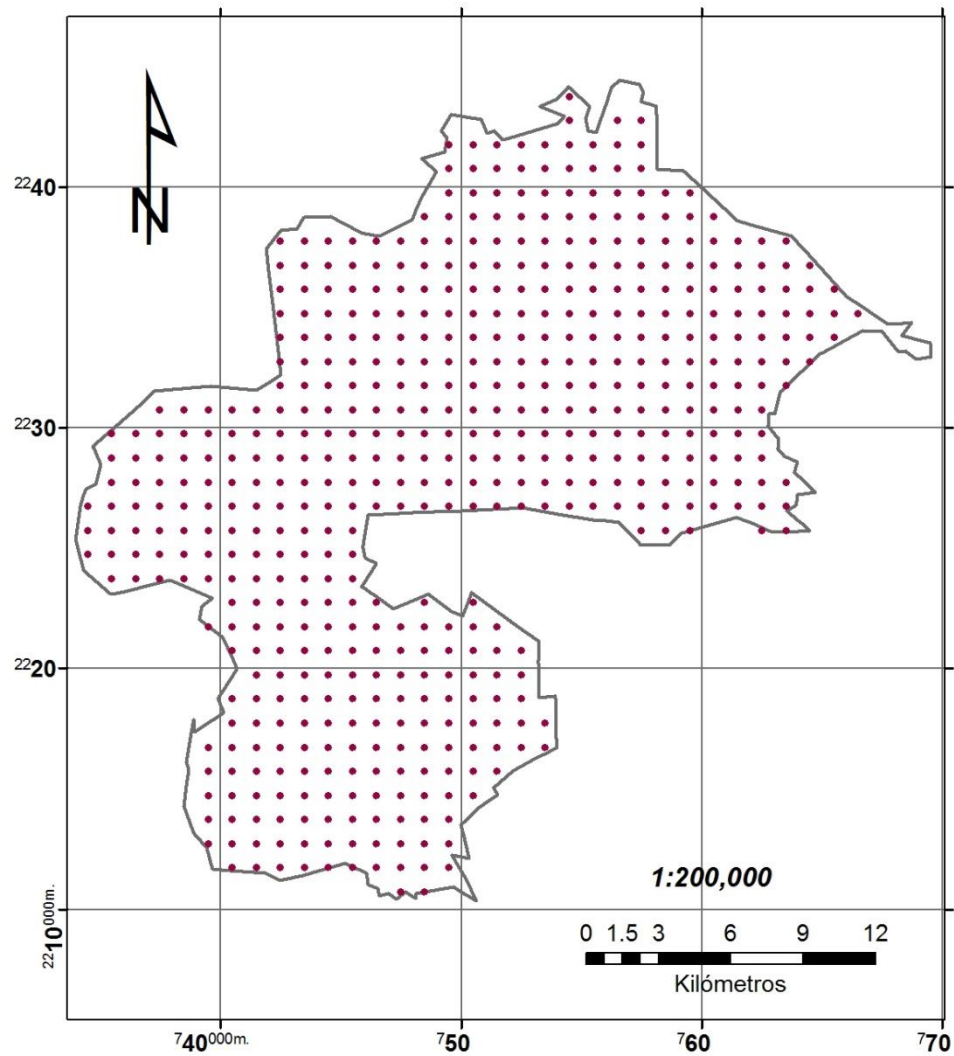


Figura 10. Ubicación de los puntos de muestreo en la Ciénega de Chapala.

El número de muestras es un factor importante para llevar a cabo la clasificación de las zonas con aptitud para el establecimiento de hortalizas (Foody and Mathur, 2006). El tamaño de la muestra será de 10 % de la superficie total (Congalton, 1988). Estos datos se utilizaron para construir la matriz de confusión, que se utiliza para comparar el

resultado de las clasificaciones a través de la información verdadera (Martínez y Curtis, 2002). Cruz *et al.* (2010), mencionan que el número de muestras debe ser de acuerdo al tamaño del terreno, esto consiste principalmente en dividir el total del área (46171 ha) entre el tamaño promedio de las parcelas (4 ha), de esta manera se obtiene el número de muestras con una precisión y exactitud aceptable, esto significa que con la utilización de la herramienta de los SIG's la diferencia entre utilizar un tamaño de muestra del 10 % con respecto a una de 90 % la diferencia en precisión de ambas no es muy significativa, de esta manera se ahorran recursos económicos y trabajo de campo que son ventajas de la utilización de estas técnicas.



Figura 11. Levantamiento de muestras de suelo en el área de estudio.

5.7.2. Análisis físico y químico de las muestras de suelo

Las muestras se secaron a la sombra (Figura 11), se molieron en mortero de porcelana, se tamizaron en malla de 2 mm y se realizaron las siguientes determinaciones correspondientes a las propiedades de suelo utilizadas para la caracterización agroecológica: pH, Conductividad eléctrica (CE), Textura, CaCO_3 , N_{total} , fósforo (P), sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Todas las determinaciones se realizaron tomando como base la Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000 (Figura 12).



Figura 12. Secado de muestras de suelo.



Figura 13. Análisis de laboratorio.

5.8. Datos climatológicos

En lo que respecta a las variables climáticas, las variables utilizadas fueron: temperatura mínima y máxima mensual, temperatura mínima anual, temperatura máxima anual, temperatura media, precipitación y evaporación. Estas variables se obtuvieron de la base de datos de las Normales Climatológicas (CNA, 2006), en un periodo de 20 años.

5.9. Análisis Geoestadístico

Para realizar el análisis geoestadístico se utilizó el paquete estadístico **R** (R Development Core Team, 2012), con las variables edafológicas y climáticas del área de estudio.

5.9.1. Análisis de variabilidad espacial

Con los datos obtenidos y con las coordenadas de los puntos de muestreo (300 puntos de prueba, 100 puntos de entrenamiento, 40 estaciones climatológicas) se realizó un análisis de la variabilidad espacial para calcular valores en sitios no muestreados, realizando una interpolación mediante el método geoestadístico y de esta manera obtener el predictor para cada una de las propiedades edáficas y climáticas.

5.9.2. Análisis de los datos

Se realizó una evaluación de la distribución de los valores mediante la generación de un histograma que muestra si los datos tienen una distribución normal, en caso de que los valores no estén normalmente distribuidos se aplica una función de ajuste que puede ser logaritmo o raíz cuadrada según sea el comportamiento de los datos.

5.9.3. Selección de variograma y Kriging

Una vez que se tienen los valores normalmente distribuidos, se realizó una selección y ajuste del semivariograma, el cual se graficó obteniendo los parámetros de inicio para hacer su ajuste, en la gráfica se observó el valor de la asíntota que se sustituyó en los parámetros de *sill* y *range* como una aproximación a los parámetros del modelo, con esta aproximación se generaron siete modelos permisibles para cada especie del estudio: *Esférico*, *Exponencial*, *Gaussiano*, *Lineal*, *Matern*, *Bessel*, *Pentaesferico* y se seleccionó el modelo que presentó el menor error, se observaron los parámetros con los que se ajustó el variograma y se graficó. Posteriormente se hizo un análisis de validación cruzada para calcular la precisión de tres Kriging: *Universal*, *Ordinario* y *Simple* para seleccionar el de menor error.

5.9.4. Interpolación Kriging

En caso de que a la variable se le haya aplicado una transformación para normalizar los valores, ésta se eliminó para hacer la presentación de mapas y la exportación de coberturas desde el programa R para ser editados en un SIG.

5.9.5. Análisis de Componentes Principales

Para reducir el número de variables y priorizar hacia aquellas que tienen mayor incidencia en el establecimiento exitoso de los cultivos potenciales, se utilizó el procedimiento de Análisis de Componentes Principales (ACP), este análisis estadístico multivariado tuvo el objetivo de convertir un problema de información estadística compleja (muchas variables de tipo cuantitativo medidas en cada unidad de observación) en otro casi equivalente pero más manejable (pocas variables nuevas) sin pérdida de información (Vivanco, 1999).

El ACP obtiene combinaciones lineales de todas las variables originales que sean ortogonales entre sí; de esta forma se obtiene un subconjunto de nuevas variables que son independientes entre sí, pero que están altamente correlacionadas con las variables originales, denominadas Componentes Principales, las que ordenadas en forma decreciente según su varianza, permiten explicar el porcentaje de variabilidad de los datos por cada componente (Martínez, 2007). Los valores y vectores característicos se obtienen diagonalizando la matriz de correlaciones, cuando se tienen variables con diferentes unidades de medida. El ACP permite la generación de índices, cuya interpretación facilite la explicación del fenómeno bajo estudio, y la agrupación de unidades experimentales en subgrupos de tipo semejantes (Zarate y Ramírez, 2004).

5.9.6. MaxEnt.

Con los requerimientos agroecológicos de los cultivos potenciales (jitomate, brócoli, lechuga, calabacita y cebolla) y con la variabilidad agroecológica de la zona de estudio, se generaron índices agroecológicos que se agruparon según favorecieron o limitaron el éxito de los cultivos. Para lo cual se requirió realizar la ubicación de los sitios de entrenamiento, para poder predecir la capacidad de las especies para sobrevivir.

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1. Análisis geoestadístico

El análisis geoestadístico de las propiedades de suelos se presentan en el Cuadro 4. El modelo esférico se ajustó a los datos de Ca y P; el exponencial a los datos de conductividad eléctrica, carbono orgánico y K; el lineal a los datos de Mg, Na, N y pH; y los datos de CaCO₃ se ajustaron al modelo Hole.

Cuadro 4. Estructura espacial de las propiedades de suelos para la capa superficial (0-30 cm).

Variable	Técnica	Mejor modelo	Nugget	Sill	Range
	kriging	usado		parcial	(m)
Ca (cmol kg ⁻¹)	Ordinario	Esférico	0.92	0.19	4233
CaCO ₃ (%)	Universal	Hole	1.40	0.004	16306
CE (dS m ⁻¹)	Ordinario	Exponencial	0.053	0.035	22980
CO (%)	Ordinario	Exponencial	0.28	0.31	25630
K (cmol kg ⁻¹)	Universal	Exponencial	0.73	0.51	1809
Mg (cmol kg ⁻¹)	Universal	Lineal	0.012	0.010	3793
Na (cmol kg ⁻¹)	Ordinario	Lineal	8.52	2.58	4004
N total (%)	Universal	Lineal	0.005	0.001	3539
P (cmol kg ⁻¹)	Ordinario	Esférico	0.30	0.14	3289
pH	Ordinario	Lineal	0.033	0.009	3057

CE= conductividad eléctrica; CO= carbono orgánico; N total= Nitrógeno total.

Las técnicas de interpolación que se seleccionaron de acuerdo a la validación cruzada *10-fold* fueron ordinario para Ca, conductividad eléctrica, carbono orgánico, Na, P, pH, y universal para los datos de suelos restantes.

6.2. Variables edáficas

6.2.1. Materia orgánica (m.o.)

El contenido de materia orgánica en los suelos es muy variable, está muy influido por las condiciones climáticas, especialmente por la precipitación. En la Figura 10 se observa que los contenidos mayores de m.o. se localizan en el noreste de la Ciénega de Chapala en el municipio de Briseñas y la parte sureste conocida como los negritos, los valores medios y bajos se localizan en la parte centro del área de estudio. El contenido de materia orgánica varía de acuerdo al clima, vegetación, topografía, material generador del suelo, edad del suelo y acción del hombre (Honorato, 2000).

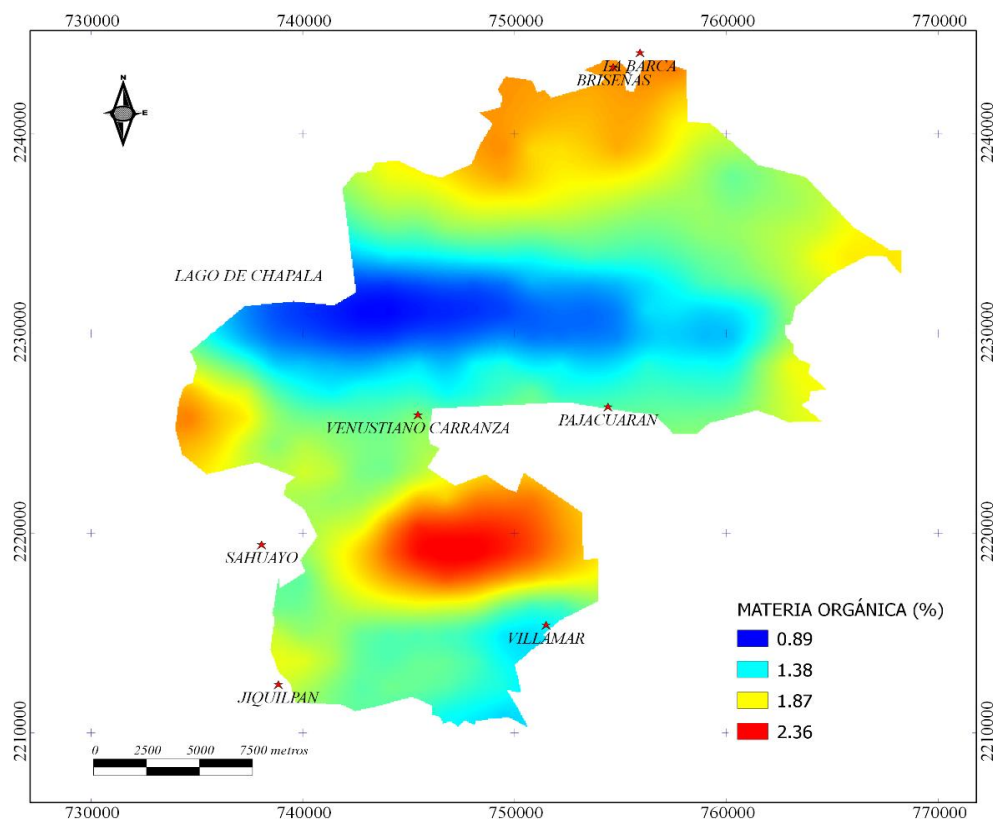


Figura 14. Variabilidad espacial de la materia orgánica en la Ciénega de Chapala.

6.2.2. pH

El pH presentó menor variabilidad por unidad de suelo, ya que es una de las propiedades químicas intrínseca de la génesis del suelo (Jiyan y Webster, 1984).

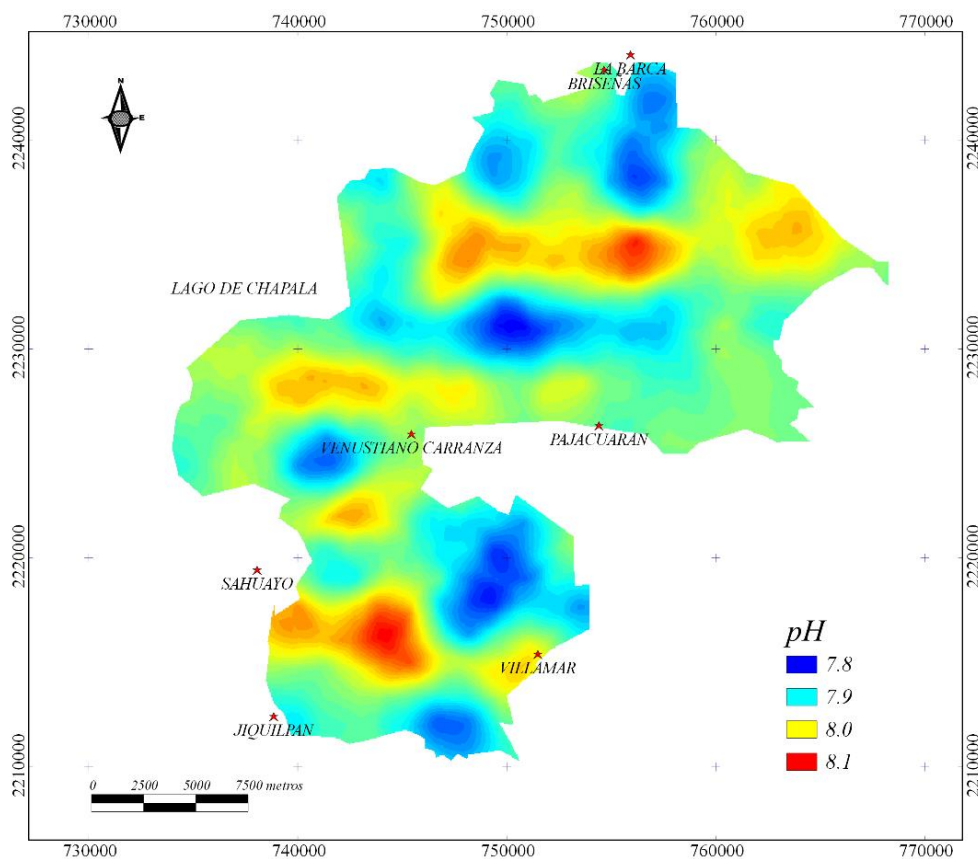


Figura 15. Variabilidad espacial del pH en la Ciénega de Chapala.

En la región de la Ciénega de Chapala se observó de manera general que la tendencia de los valores de pH va de ligeramente alcalino a alcalino 7.8 – 8.1 (Figura 11), ello puede ser resultado de que en la zona al disminuir la precipitación se presenta una acumulación de cationes debido a un proceso de arrastre y a un drenaje deficiente, aunado a la adición de fertilizantes en zonas de cultivo (Jordán, 2006).

Es importante conocer el mecanismo por el cual se regula la actividad del H^+ , debido a que con este criterio es posible juzgar si un suelo es ácido o alcalino, además de que permite determinar la disponibilidad de los nutrientes; para nuestro caso, podemos observar que los suelos de esta región presentan deficiencias de fósforo (P), manganeso (Mg) y boro (B).

6.2.3. Conductividad eléctrica (CE)

Los valores de conductividad eléctrica que predominaron en la región se encuentran entre 2 – 4 dSm^{-1} (Figura 12), clasificándose como suelos salinos (Richards, 1954).

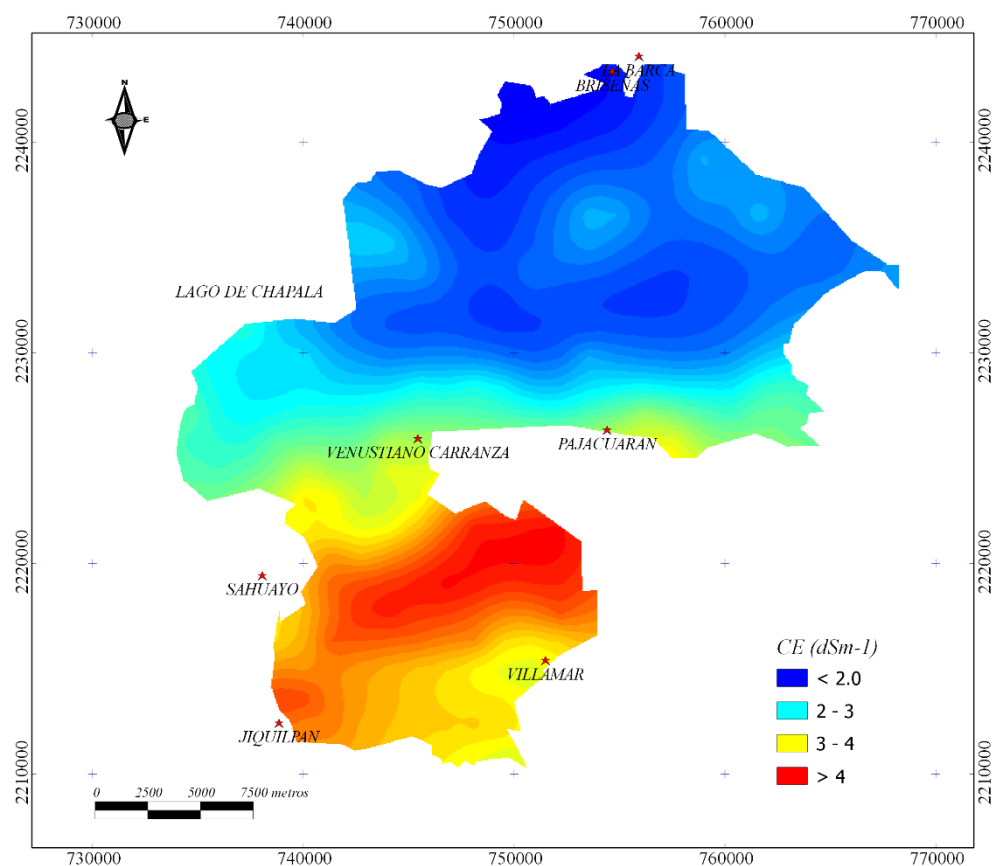


Figura 16. Variabilidad espacial de la conductividad eléctrica en la Ciénega de Chapala.

De la Peña (1980), establece que una de las causas de que los suelos sean salinos, se debe a las sales disueltas en las aguas de escorrentía se acumulan en las depresiones y al evaporarse en la solución se forman acumulaciones de sales.

6.2.4. Potasio K

Para el caso del potasio los valores más altos se localizan en las partes bajas de la falla de Pajacuarán el cerro grande del poblado de Emiliano Zapata, donde dominan suelos vertisoles (INEGI, 1974), estos valores están entre 0.16 – 0.20 cmol kg^{-1} (Figura 13).

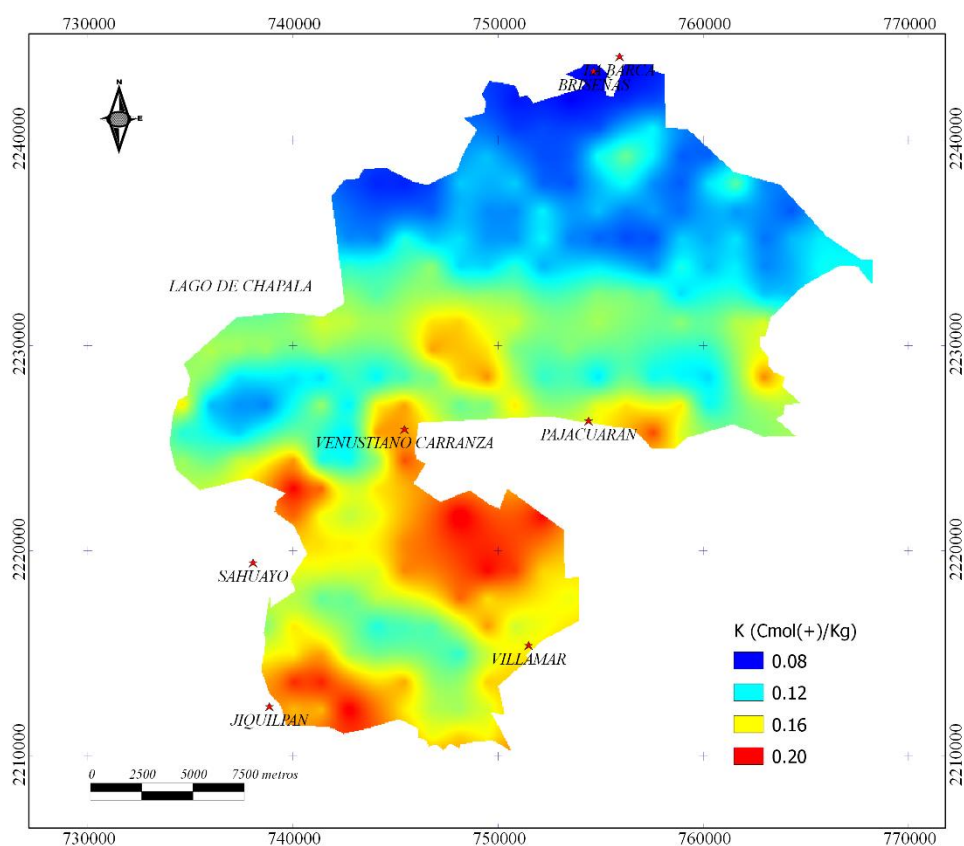


Figura 17. Variabilidad espacial del potasio en la Ciénega de Chapala.

De acuerdo con Moreno Dahme (1992), los valores antes mencionados se encuentran en concentraciones bajas. Cabe mencionar que estas concentraciones

indican que existen deficiencias de potasio, ya que la cantidad de K en un suelo sin fertilizar depende de la cantidad y tipo de minerales potásicos y condiciones ambientales durante la formación del suelo (Hernández, 2010).

6.4.5. Nitrógeno total (N_t)

Los valores de nitrógeno total oscilan entre 0.032 – 0.15 % (Figura 14).

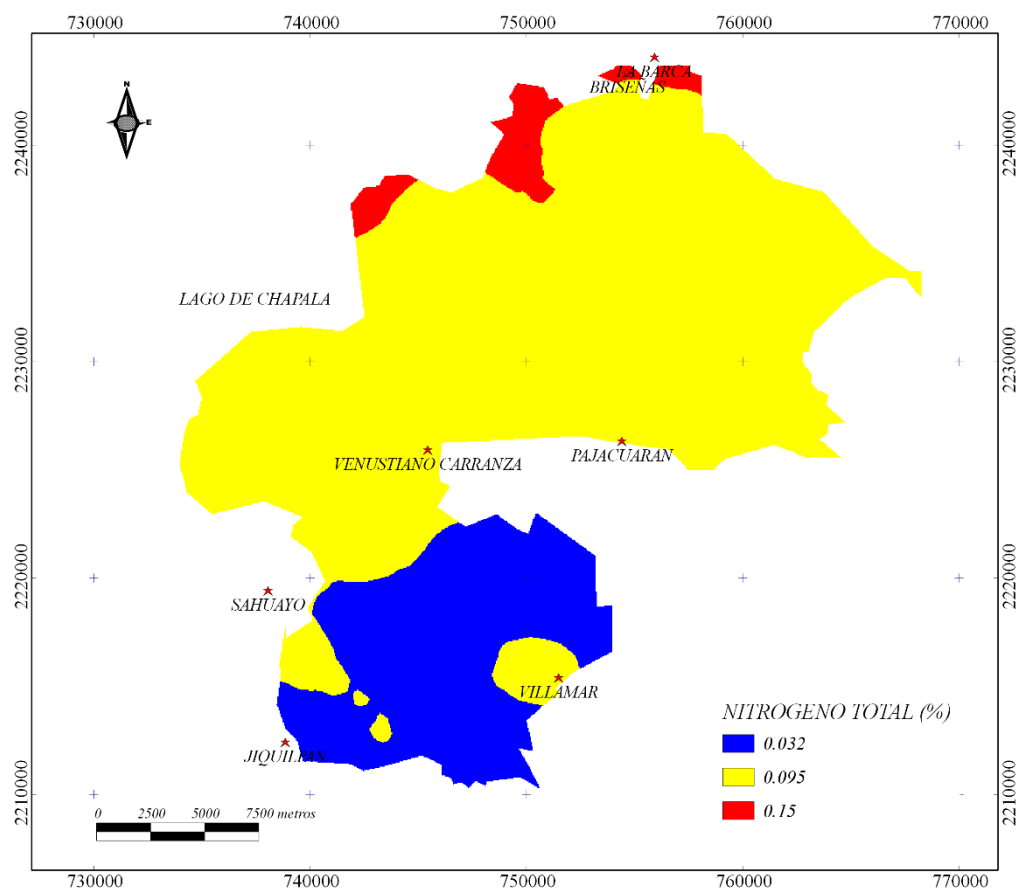


Figura 18. Variabilidad espacial del N_t en la Ciénega de Chapala.

6.3. Variables climáticas

6.3.1. Temperatura máxima

La temperatura máxima oscila entre los 26.1 – 30 °C (Figura 15), los menores valores de la temperatura máxima se registraron en la zona SW del área de estudio en los municipios de Jiquilpan, Sahuayo y el poblado de La Palma, colindando con el Lago de Chapala.

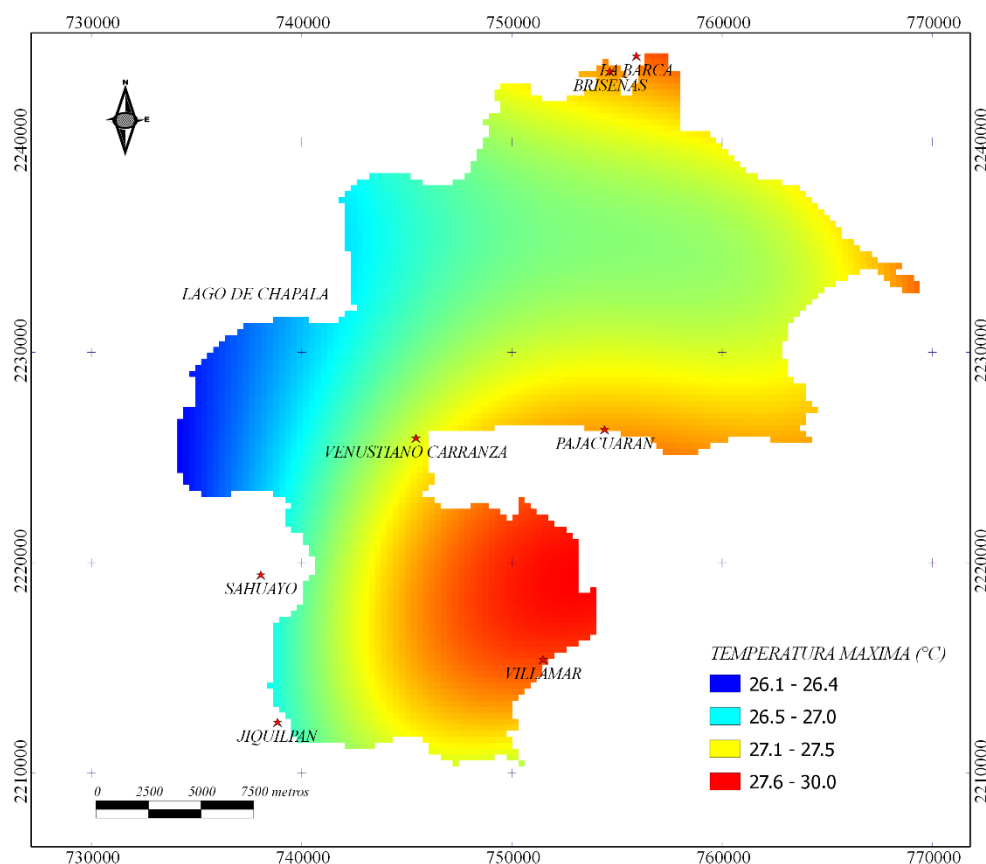


Figura 19. Variabilidad espacial de la Tmax en la Ciénega de Chapala.

Las temperaturas máximas se localizaron en zonas aledañas a la falla de Pajacuarán, los factores ambientales influyen en todos los aspectos del crecimiento de los cultivos potenciales y determinan la magnitud con la que se expresa su potencial genotípico (Schaffer y Whinley, 2007).

6.3.2. Precipitación

La precipitación presenta valores que oscilan entre 741 – 890 mm (Figura 16). En cuanto a la precipitación, las necesidades de los cultivos potenciales se encuentran en el rango, por lo cual estas precipitaciones no son factor limitante para la producción de estas hortalizas (Salazar-García, 2002).

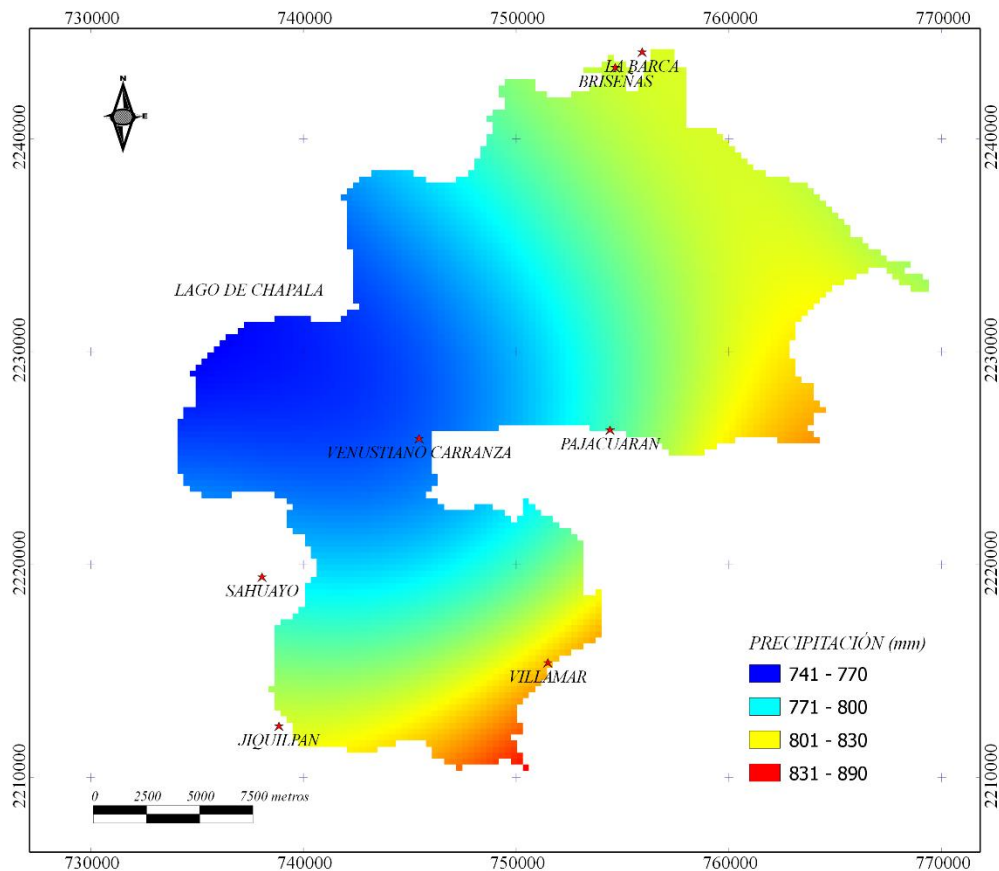


Figura 20. Variabilidad espacial de la Tmax en la Ciénega de Chapala.

De esta manera el área con suelos de tipo Vertisol correspondiente a la zona de la Ciénega de Chapala correspondiente a los que colindan con los poblados de Cuatro Esquinas, San Gregorio y el Capulín.

6.3.3. Evaporación

La evaporación osciló entre los valores de 1908 – 2285 mm (Figura 17). Los valores mas altos de evaporación se presentaron en las áreas donde se presentó la temperatura máxima y los índices de precipitación menores se registraron en lo que respecta al municipio de Villamar, y al NE con el poblado de Vista Hermosa.

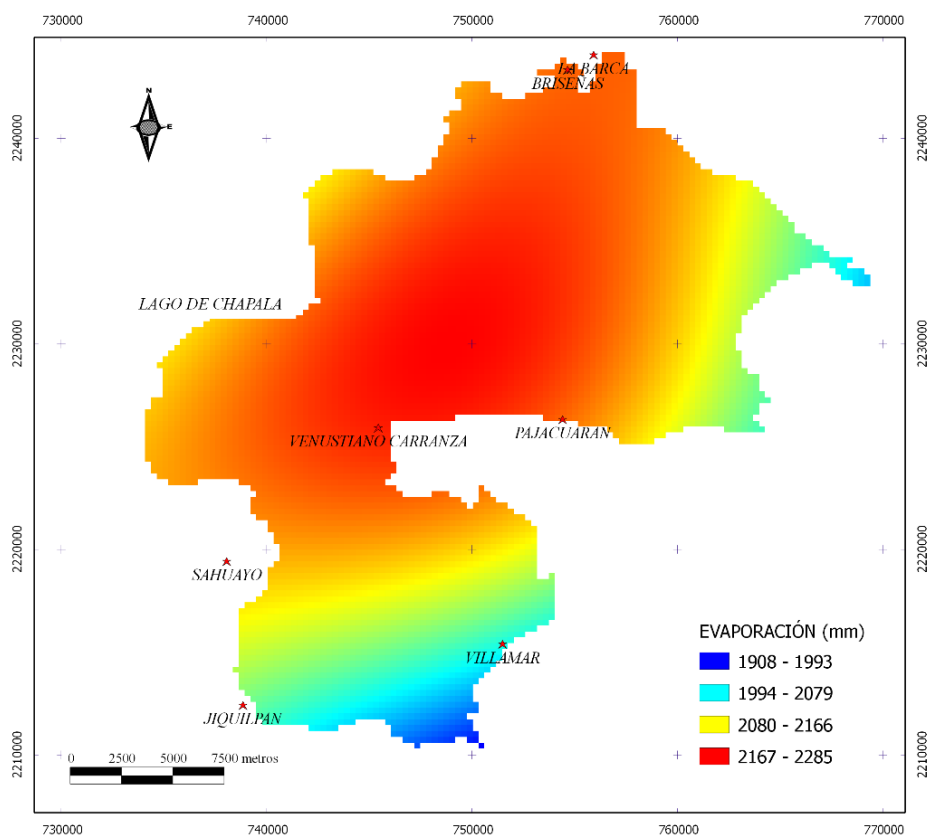


Figura 21. Variabilidad espacial de la Evaporación en la Ciénega de Chapala.

6.4. Análisis de componentes principales

Para generar los índices agroecológicos que determinen el desarrollo de los cultivos potenciales (jitomate, calabacita, cebolla, brócoli, lechuga), se utilizó el Análisis de Componentes Principales (ACP). Este permitió valores asociados con

la variable o variables que explicaron el mayor porcentaje de la variación agroecológica de la zona (Cuadro 5).

Cuadro 5. Estimaciones de contribución relativa de los predictores ambientales para el modelado en Maxent.

Predictor	Brócoli	Calabacita	Cebolla	Jitomate	Lechuga
PC1	57.6	27.1	64.6	64.9	64.9
PC2	17.5	23.9	10.7	13	13
PC3	9.8	22.7	8.1	11.2	11.2
PC4	8.6	16.8	6.9	4.3	4.3
PC5	3.6	6.2	5.2	3.5	3.5
PC6	2.1	3.2	3.9	1.7	1.7
PC7	0.8	0.2	0.7	1.3	1.3

Los modelos de distribución de las especies cultivadas obtuvieron valores de área debajo de la curva (AUC, por sus siglas en inglés) de la curva ROC de acuerdo a la prueba de validación de 0.866, 0.853, 0.907, 0.899 y 0.629 para brócoli, calabacita, cebolla, jitomate y lechuga, respectivamente. Los predictores ambientales (en este caso CP) que tuvieron la mayor contribución relativa en el modelado con Maxent se presentan en el Cuadro 5. Los primeros tres CP tienen una contribución relativa en los modelos de más del 80 %, excepto para calabacita donde estos tienen el 74 %. Las variables originales más importantes de acuerdo a los primeros tres CP son Ca, evaporación anual, temperatura máxima, conductividad eléctrica, nitrógeno total, K y precipitación anual (Cuadro 6).

Cuadro 6. Variables originales de mayor importancia en el modelo, de acuerdo a los primeros tres CP.

Variable original	PC1	PC2	PC3
Ca(cmol kg ⁻¹)	0.27	0.25	0.13
CaCO ₃ (%)	0.20	-0.31	0.02
CE(dS m ⁻¹)	0.23	-0.38	0.26
CO (%)	0.26	-0.02	-0.11
Evapo	0.33	0.42	0.19
K(cmol kg ⁻¹)	0.25	-0.18	0.31
Mg(cmol kg ⁻¹)	0.20	-0.04	0.25
N(%)	0.24	0.53	-0.07
Na(cmol kg ⁻¹)	0.16	-0.20	0.16
P(cmol kg ⁻¹)	0.24	0.10	0.20
pH	0.24	0.16	0.06
Prec (mm)	0.24	-0.06	-0.68
Tmax (°C)	0.30	-0.08	-0.31
Tmed (°C)	0.27	-0.18	-0.24
Tmin (°C)	0.25	-0.12	0.06

CE= conductividad eléctrica; Evapo= Evaporación anual; C:N= relación carbono-nitrógeno; CO= carbono orgánico; MO= materia orgánica; Prec= precipitación anual; Tmax= temperatura máxima anual; Tmed= temperatura media anual; Tmin= temperatura media anual.

6.5. Análisis en MaxEnt

A partir de los componentes principales y sus variables asociadas, se determinaron las zonas de las regiones agroecológicas para el establecimiento de cultivos potenciales, mediante la utilización de un software de modelado de distribución potencial, MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006).

La Figura 18 muestra los mapas de idoneidad de las cinco especies cultivadas. En general la zona muy apta para los cinco cultivos de hortalizas se localiza en la porción sur de la Ciénega de Chapala y las zonas aptas tienen un patrón de distribución heterogéneo, en promedio 12466 ha que representan el 34 % resultan zonas aptas y muy aptas para los cultivos de calabacita, cebolla y lechuga y menos de 6002 ha que representan el 13 % para jitomate y brócoli. Aproximadamente 18468 ha que representan el 40 % de la Ciénega de Chapala tiene condiciones ambientales no idóneas para los cinco cultivos.

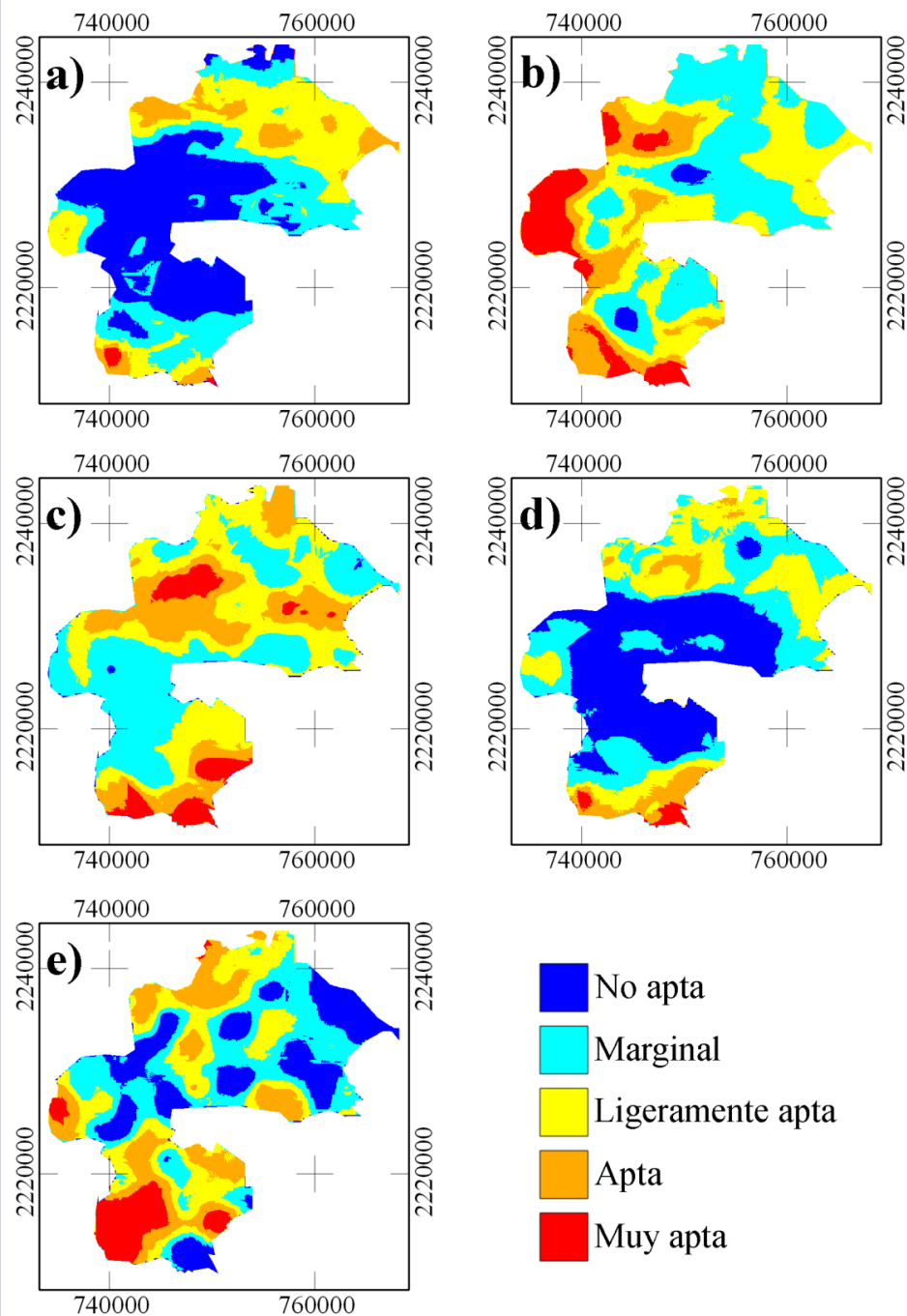


Figura 22. Mapas de idoneidad de cinco cultivos. a) brócoli (*Brassica oleracea*); b) calabacita (*Cucurbita pepo*); c) cebolla (*Allium cepa*); d) jitomate (*Solanum lycopersicum*); e) lechuga (*Lactuca sativa*).

7. CONCLUSIONES

El área con condiciones muy aptas y aptas para los cultivos de jitomate, brócoli, calabacita, cebolla y lechuga, se sitúa en la porción sur y centro de la Ciénega de Chapala, donde las condiciones agroecológicas permitirán una alta adaptabilidad de los cultivos.

Las variables químicas y ambientales más importantes para el establecimiento de jitomate, brócoli, calabacita, cebolla y lechuga fueron: Ca, evaporación anual, temperatura máxima, conductividad eléctrica, nitrógeno total, K y precipitación anual; estas permitieron generar categorías: no apta, marginal, ligeramente apta, apta y muy apta, esta jerarquización permitió seleccionar áreas que constituyen una alternativa para el establecimiento de los cultivos antes mencionados.

El modelado con Maxent resultó ser una herramienta importante para definir zonas óptimas para el desarrollo de los cultivos en el presente estudio, lo cual permitirá mejorar los planes y programas de cultivos del Distrito de Riego 024 Ciénega de Chapala.

8. LITERATURA CITADA

- Carbonell, J., A. Amaya, B. V. Ortiz, J. S. Torres, R. Quintero y C. H. Isaac. 2001. Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el Valle del Río Cauca. Tercera aproximación, Centro de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Colombia, Serie técnica no. 29, Cali, Colombia. pp. 354.
- Carmona J. A y R. J. Monsalve (2000), Sistemas de información Geográfica, Monografías, com. pp. 122.
- Castaños M. C. 2000. Horticultura manejo simplificado. Dirección General del Patronato Universitario. Universidad Autónoma Chapingo. pp. 527.
- Congalton, R. G. 1988. A comparison of sampling scheme use in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. pp. 600.
- Demey J. R. Adams M. and Freitas H. 1992. Uso del método de análisis de componentes principales para la caracterización de fincas agropecuarias. Agronomía Tropical 3:475–497.
- FAO. 1997. Zonificación agro-ecológica: Guía general. Boletín de Suelos 73. Roma. pp. 65.
- Fernández, P.J.M. y L. M. A. Sumano .1992. Introducción a los sistemas de Información Geográfica, Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, México.
- Foody, M.G. and Mathur, A., 2006. The use of small training sets containing mixed pixels for accurate hard image classification: Training on mixed spectral

responses for classification by a SVM. *Remote Sensing of Environment*, 103, pp. 179-189.

François, M. J., J. R. Díaz G. y A. Pérez V. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Num. 51. pp. 87.

Gardiazabal I. F. 1990. Requerimientos de clima, suelo y agua para la implantación de paltos. *Memorias del Curso Internacional sobre Producción, Postcosecha y Comercialización de Paltas*. FAO. Universidad Católica de Valparaíso. Chile. pp 238.

Guenkov, G. 1974. *Fundamentos de Horticultura Cubana*. Instituto Cubano del libro. La Habana, Cuba.

Hernandez P.A., Graham C.H., Master L.L. and Albert D.L. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 29:pp. 785.

Horonato P.R. 2000. *Manual de edafología*. Alfaomega. 196 pp.

Jiyan X., Webster R. 1984. A geostatistical study of topsoil properties in Zhangwu country, China. *Catena* 11:13–26.

Maroto J.V., 1990. *Elementos de Horticultura General*. Ediciones Mundi-Prensa. España. pp. 343.

Martínez F., J. L., Tijerina C., L., Arteaga R., R., Vázquez P., M. A. Becerril R., A. E. 2007. Determinación de zonas agroclimáticas para la producción de

- mango (*Mangifera indica* L. "Manila") en Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*: Num. 63. pp. 154.
- Martínez, R. J. J. y H. Curtis M. 2002. Soil Classification in Arid Lands with Thematic Mapper Data. *Terra* 20: pp. 120
- Nozica, G., M. Herique y R. Porcel. 1997. *Sistemas de Información Geográfica*.
- Pebesma, E.J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers and Geosciences*, 30: pp. 691.
- Pérez G. M., Márquez S. F., y Peña L. A., 1997. Mejoramiento genético de hortalizas. Dirección General de Difusión Cultural. Universidad Autónoma Chapingo. pp. 380.
- Pérez M. M. Peña C. M. y Villareal L. O. 2006. Aplicación del análisis de componentes principales a la inmunización financiera: el caso del mercado español de deuda pública. *Revista Latinoamericana de Administración*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia 36: pp.119.
- Pérez P., E., y D. Geissert K. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.) - palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). pp. 87.
- Phillips S.J., Anderson R.P. and Schapire R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:pp. 259.
- R Development Core Team. 2009. R: A language and environment for Statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. URL <http://www.R-project.org>.

- Richards L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México, D.F. 187 pp.
- Ruiz, V. J. 1998. Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los valles centrales de Oaxaca. I. Determinación del potencial productivo, Terra, vol. 16 núm 3, pp. 275.
- Smith, P. M., Zhu, X. A., Burt, E. J., Stiles, C. 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. Geoderma 137: pp. 69.
- Tamaro D. 1985. Horticultura. Editorial G. Gili. México D.F. pp. 508.
- Torriente D. D. and Torres C. V. 2010. El análisis de componentes principales en la interpretación de sistemas agroecológicos para el manejo de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el cultivo de la caña de azúcar. IDESIA 28: pp. 32.
- Verheye WH. 1993. Matching land qualities and land use requirement for land suitability classification. En Ruíz JF (Ed.) Evaluación de tierras para una agricultura sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. México. pp. 235.
- Villa, C. M. M., I. M. A. Inzunza y V. E. Catalán (2001), Zonificación agroecológica de hortalizas involucrando grados de riesgo, Terra, vol 19, núm 1, pp. 7.
- Yanaguchi M. 1983. World Vegetable Principles, Production and Nutritive values. AVI Publishing Company, INC. West Port, Connecticut, USA. pp. 405.
- Zarate Z. R., Ramírez E. G. 2004. Metodología Estadística para la interpretación de datos sobre la degradación de la tierra. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo México. pp. 128

Anexos

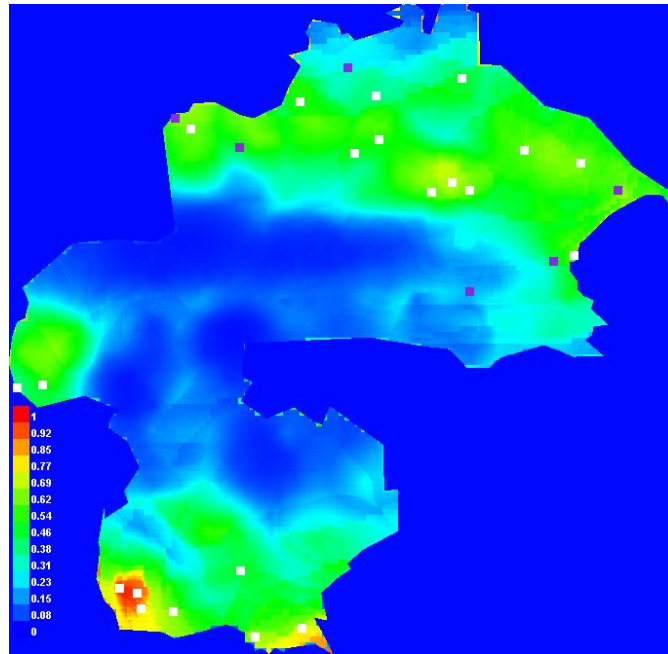


Figura 23. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de brócoli en la Ciénega de Chapala.

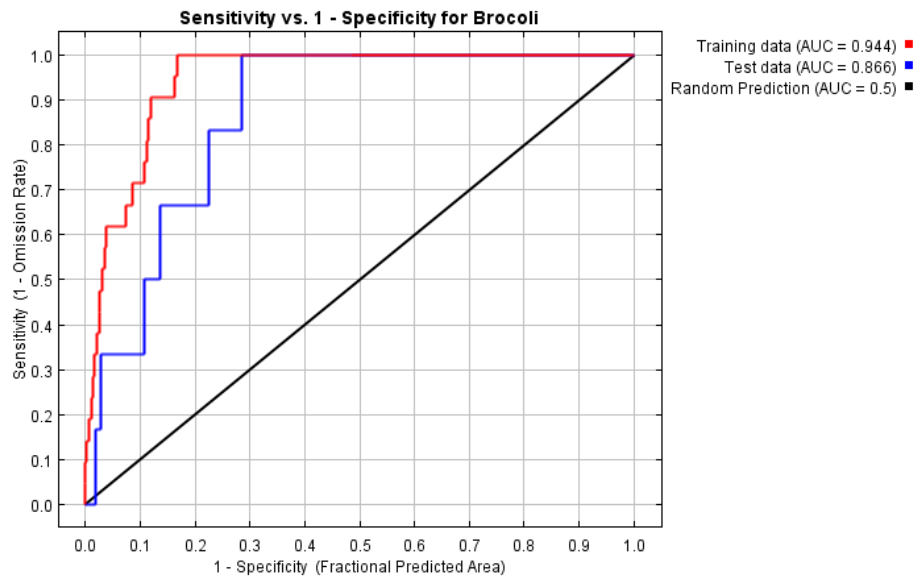


Figura 24. Curva respuesta a la predicción del cultivo del brócoli.

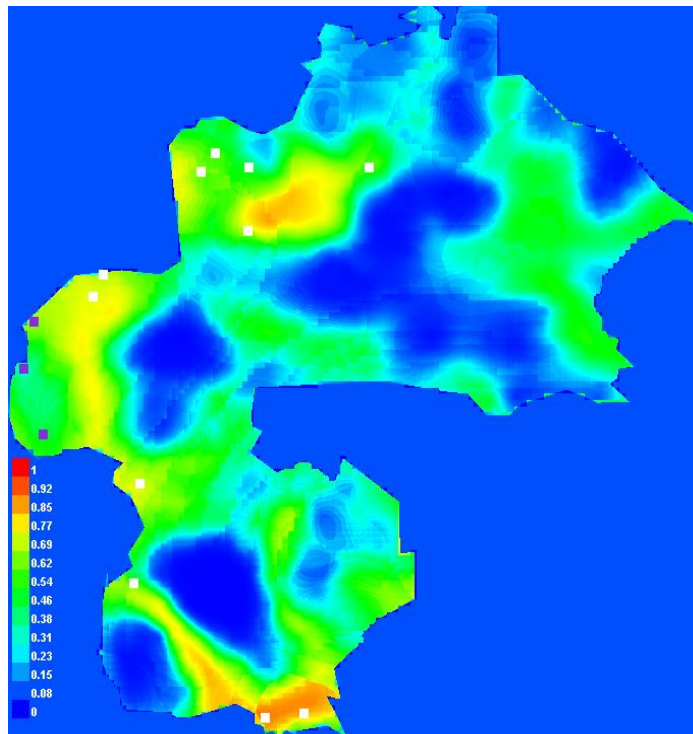


Figura 25. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de calabacita en la Ciénega de Chapala.

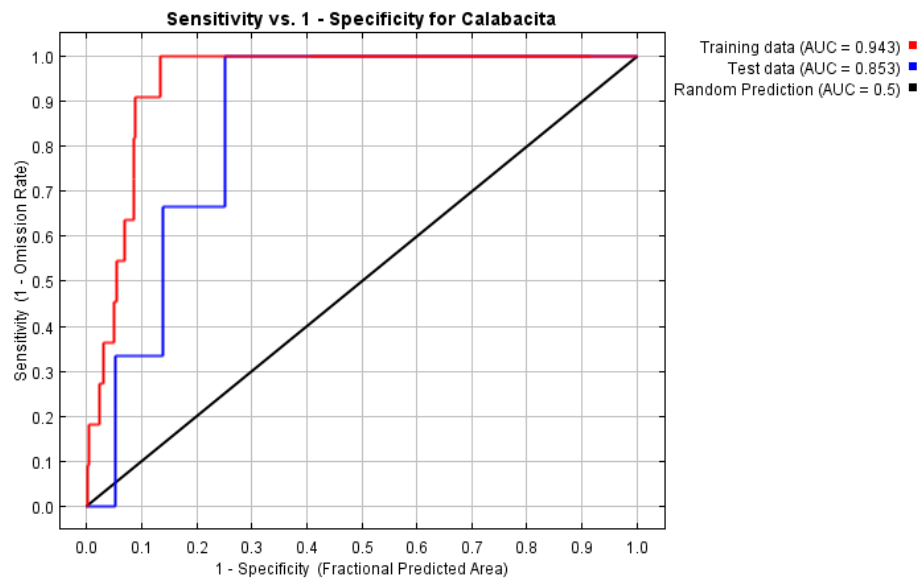


Figura 26. Curva respuesta a la predicción del cultivo de calabacita.

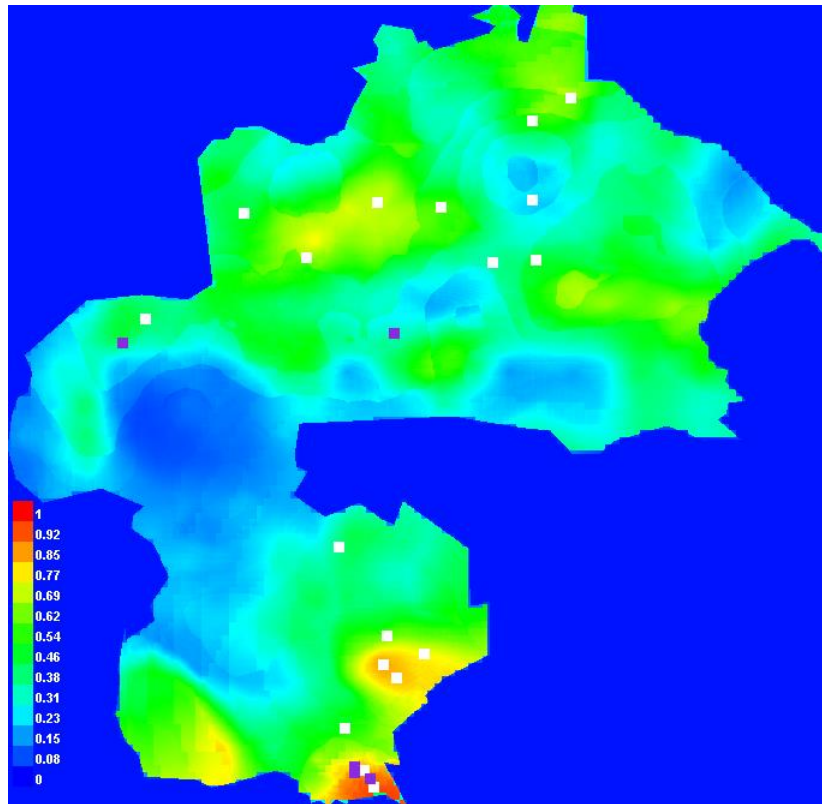


Figura 27. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de cebolla en la Ciénega de Chapala.

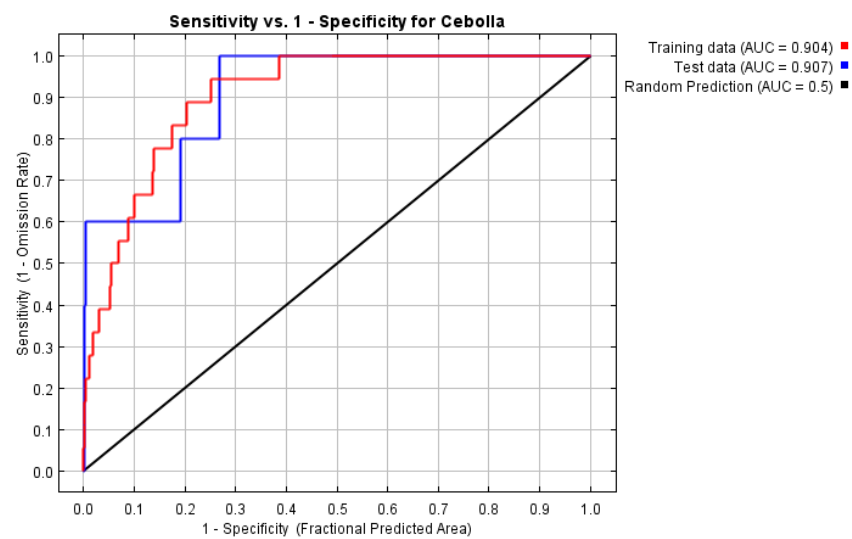


Figura 28. Curva respuesta a la predicción del cultivo de cebolla.

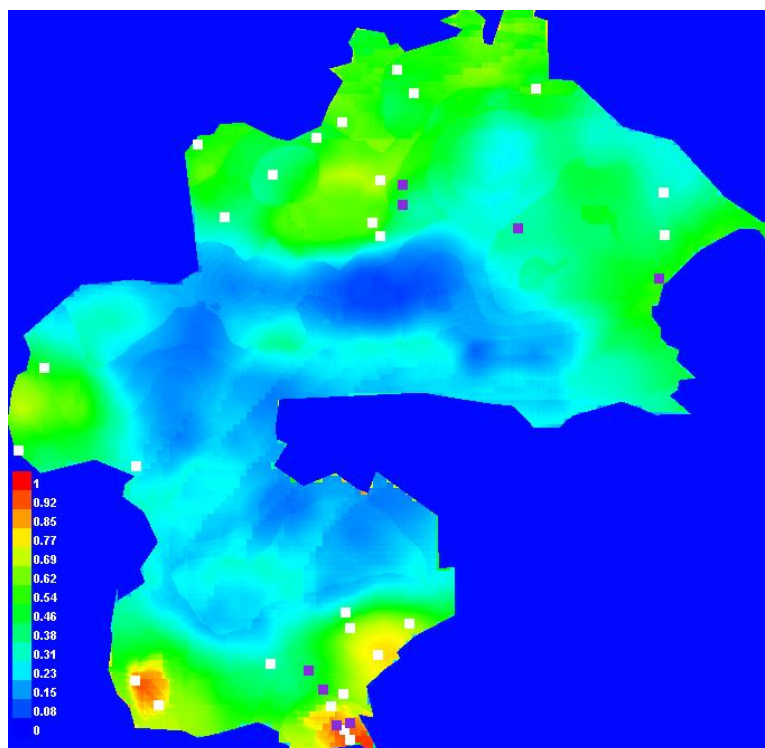


Figura 29. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de Jitomate en la Ciénega de Chapala.

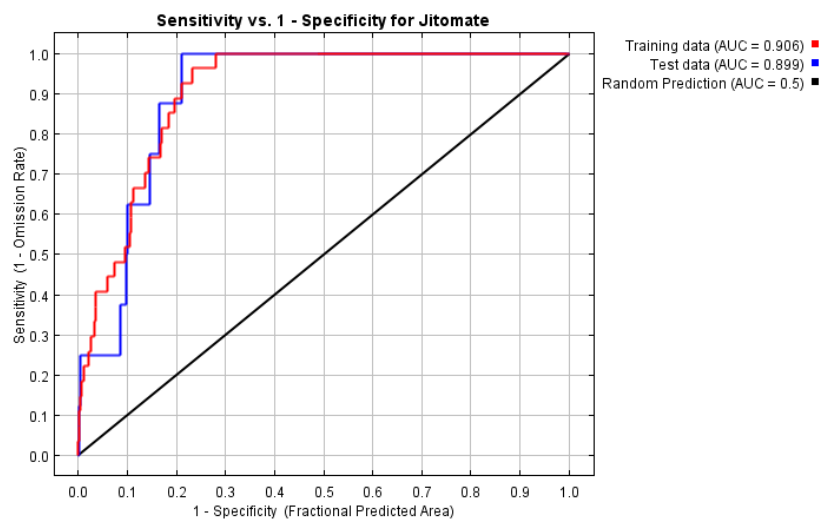


Figura 30. Curva respuesta a la predicción del cultivo de Jitomate.

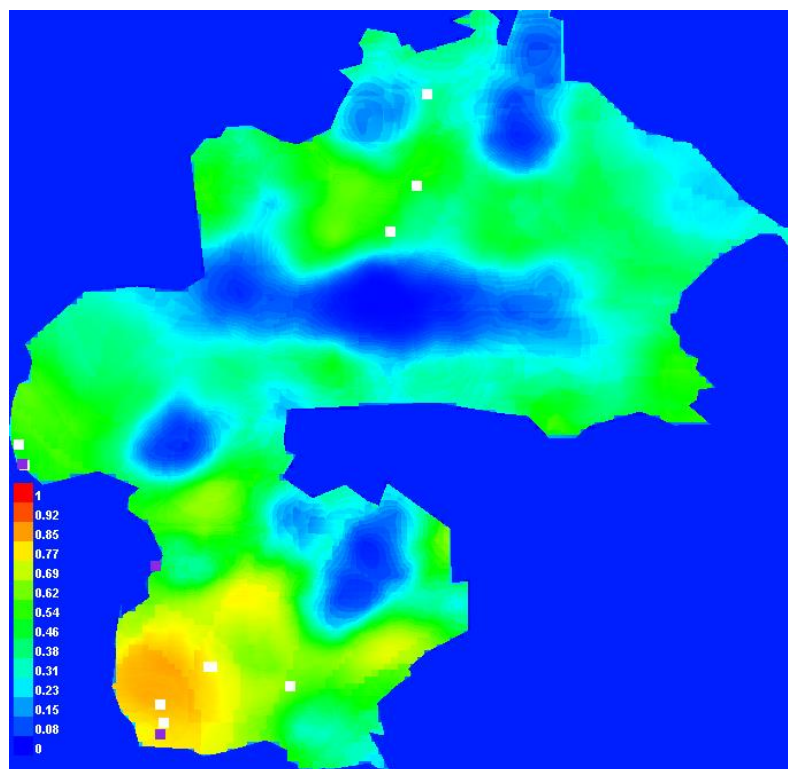


Figura 31. Distribución potencial del MaxEnt para el cultivo de Lechuga en la Ciénega de Chapala.

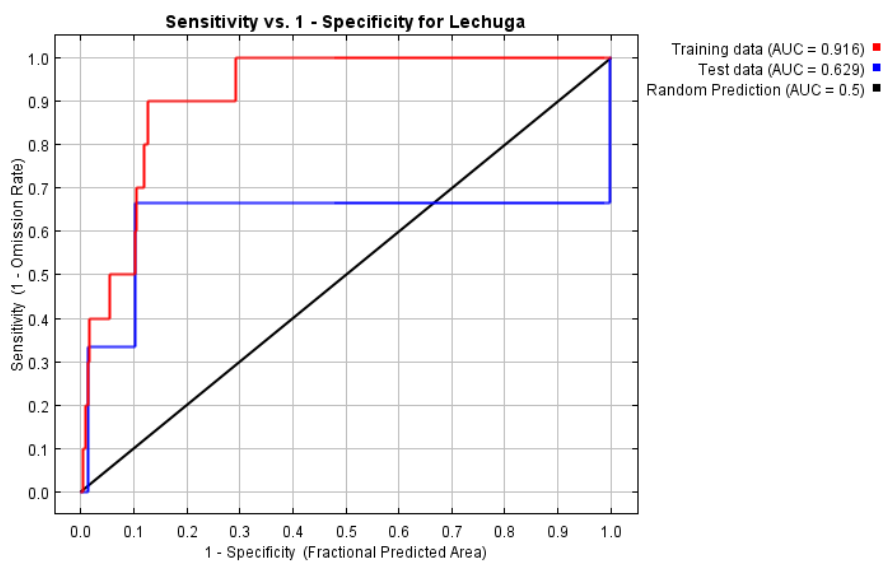


Figura 32. Curva respuesta a la predicción del cultivo de Lechuga.