



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

ZONIFICACIÓN DE ALGUNOS CULTIVOS HORTÍCOLAS Y BÁSICOS EN EL ACUÍFERO HUICHAPAN-TECOZAUTLA, HIDALGO, MÉXICO

HÉCTOR JAVIER REYES ROSAS

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

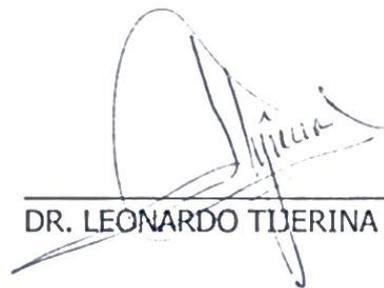
La presente tesis titulada **"Zonificación de algunos cultivos hortícolas y básicos en el acuífero Huichapan-Tecoautla, Hidalgo, México"** realizada por el alumno: Héctor Javier Reyes Rosas, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. LEONARDO TIJERINA CHÁVEZ

ASESOR



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR



M.C. GUILLERMO CRESPO PICHARDO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, marzo de 2015

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), que con su apoyo financiero permitió que esta meta se llevara a cabo.

AL Colegio de Postgraduados por haberme dado la oportunidad de continuar con mi formación académica, brindándome las enseñanzas y conocimientos durante mi estancia en esta institución.

AL programa de Hidrociencias, personal académico y administrativo por el apoyo y facilidades otorgadas durante mi permanencia.

A los doctores Leonardo Tijerina Chávez, Mario Alberto Vázquez Peña y Guillermo Crespo Pichardo, por sus consejos, observaciones y el gran apoyo brindado durante la elaboración de este trabajo, por haber compartido sus conocimientos y sobre todo por su amistad.

A mis compañeros y amigos, quienes estuvieron conmigo en momentos gratos y difíciles, haciendo más amena la vida como estudiante.

DEDICATORIA

Con mucho cariño a mis padres Edén y Aida por apoyarme en todo momento para poder llegar a esta instancia de mis estudios y por creer en mí, por sus palabras de motivación, amor y entusiasmo.

A mi novia Clary por su paciencia y comprensión, quien me apoyó y alentó para continuar cuando parecía que me rendía, gracias por estar a mi lado y por sacrificar tu tiempo para que pudiera concluir esta meta.

A mis hermanos Beto, Queta y Tavo, gracias por estar conmigo, por compartir momentos felices y por su apoyo incondicional.

A mis sobrinos quienes han sido una fuente de inspiración, motivación y felicidad.

A mis maestros que en este andar por la vida influyeron con sus enseñanzas y experiencias para formarme como una persona de bien y prepararme para los retos que pone la vida.

A todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto, ustedes saben quiénes son.

“El camino hacia el éxito siempre está en construcción”. Lily Tomlin

ÍNDICE GENERAL

	Pagina
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPOTESIS	4
2.1. Objetivo General	4
2.2. Objetivos Particulares	4
2.3. Hipótesis	5
III. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1. Zonificación	6
3.2. Zonificación Agroecológica (ZAE) y Los Sistemas de Información Geográfica	12
3.3. Requerimientos Agroecológicos de los cultivos	14
3.4. Importancia de los Factores Climáticos y Edáficos	15
3.4.1. Elementos Climáticos.....	15
3.4.1.1. Radiación Solar	16
3.4.1.2. Temperatura.....	16
3.4.1.3. Precipitación.....	17
3.4.1.4. Evaporación	17
3.4.2. Factores Edáficos.....	18
3.4.2.1. Textura del suelo.....	18
3.4.2.2. pH.....	19
3.4.2.3. Salinidad.....	19
3.4.2.4. Profundidad	19
3.4.2.5. Drenaje.....	20
3.4.2.6. Pendiente (%).....	20
3.5. Grados días de desarrollo (GDD).....	21
3.6. Estimación de Heladas.....	22

3.6.1. Clasificación de las Heladas.....	24
3.6.2. Daño por Heladas	24
3.6.3. Grado de daños por heladas	25
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1. Localización y descripción de la zona de estudio.....	26
4.1.1. Selección de la información climatológica.....	27
4.1.2. Gradiente Térmico.....	29
4.1.3. Características ambientales de la zona de interés.....	31
4.1.3.1. Clima	31
4.2. Especies de interés en la zona de estudio	33
4.2.1. Descripción de los requerimientos de cultivo	33
4.3. Metodología.....	37
4.4. Estimación de las medias de Temperaturas máximas y mínimas.....	37
4.5. Periodo Libre de Heladas.....	39
4.6. Cálculo de los Grados Días de Desarrollo (GDD)	40
4.7. Precipitación.....	43
4.7.1. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)	44
4.8. Estimación de la Pendiente.....	44
4.9. Análisis espacial.....	45
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
5.1. Zonificación por Temperatura.....	47
5.2. Estimación del Periodo Libre de Heladas.....	53
5.3. Estimación Grados Días de Desarrollo (GDD)	56
5.4. Zonificación por Precipitación.....	65
5.5. Estimación del Balance Hídrico.....	70
5.6. Cálculo de los requerimientos de agua para el cultivo	75
5.6.1 Relación entre la Precipitación, ETc, Periodo libre de heladas y la fecha de siembra.	76
5.7. Zonificación Edáfica	80
5.7.1. Zonificación por Textura del suelo.....	80
5.7.2. Zonificación por profundidad del suelo.....	81
5.7.3. Zonificación por Pendiente (%)	84
5.8. Mapa de clases de aptitud de Suelo	85
5.9. Algebra de Mapas de las variables edafoclimáticas por cultivo	86
5.10. Algebra de Mapas de las variables suelos, temperatura y precipitación	90

VI. CONCLUSIONES	96
VII. LITERATURA CITADA	99
VIII. ANEXOS	105
ANEXO I. Descripción de los Cultivos	105
ANEXO II. Requerimientos y déficits para los cultivos de interés	115

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Municipios que integran la zona de estudio y superficie que representan.....	27
2	Estaciones meteorológicas seleccionadas.....	29
3	Especies de interés para la investigación.....	33
4	Requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos de interés....	36
5	Clasificación de temperaturas de acuerdo a su requerimiento térmico de los cultivos de interés en °C.....	48
6	Estaciones meteorológicas con estimaciones de periodos libres de heladas.....	54
7	Fechas de siembra y cosecha para cada cultivo y periodo de crecimiento.....	56
8	Grados días acumulados para cada estación meteorológica por ciclo del cultivo.....	58
9	Clasificación de zonas aptas de acuerdo a su requerimiento de precipitación de los cultivos de interés en mm.....	66
10	Estimación de la evapotranspiración.....	71
11	Balance hídrico zona norte.....	71
12	Balance hídrico zona centro.....	72
13	Balance hídrico zona sur.....	73
14	Coeficiente del cultivo (kc).....	76
15	Requerimiento y déficit hídrico para el cultivo de maíz en la zona norte.....	77
16	Requerimiento y déficit hídrico para el cultivo de maíz en la zona centro.....	78
17	Requerimiento y déficit hídrico para el cultivo de maíz en la zona sur.....	79
18	Clasificación de aptitud por textura.....	81
19	Clasificación de aptitud por profundidad del suelo.....	81
20	Tipos de suelos de la zona de estudio.....	83
21	Clasificación de aptitud por Pendiente.....	84
22	Demeritación de la Aptitud por clase de Suelos.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Metodología simplificada de la zonificación agroecológica de cultivos.....	11
2	Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	26
3	Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas.....	28
4	Comportamiento del gradiente térmico en la zona de estudio.....	31
5	Distribución de climas en la zona de estudio.....	32
6	Interfaz de la hoja de cálculo FriskNH.....	39
7	Hoja “data” para la introducción de los datos diarios y Temperatura crítica.....	40
8	Casos del Método del seno simple.....	41
9	Interfaz del programa DegDay.....	41
10	Introducción de las temperaturas umbrales inferior y superior del cultivo de interés.....	43
11	Introducción de las temperaturas máximas y mínimas diarias.....	43
12	Clasificación de temperaturas para el cultivo del ajo.....	48
13	Localización de áreas con aptitud térmica para los cultivos de Ajo y Pepino.....	50
14	Localización de áreas con aptitud térmica para el cultivo de Calabacita.....	50
15	Localización de áreas con aptitud térmica del cultivo de Cebolla.....	51
16	Localización de áreas con aptitud térmica para el cultivo de Chile.....	51
17	Localización de áreas con aptitud térmica para los cultivos de Frijol, Jitomate y Maíz.....	52
18	Localización de áreas con aptitud térmica para el cultivo de Tomate de cáscara.....	52
19	Probabilidad de tener una temperatura mínima más baja que la temperatura crítica en una fecha más tardía en primavera o más temprana (estación met. Huichapan).....	53
20	Representación espacial de los periodos libres de heladas en la zona de estudio.....	55

21	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Ajo.....	60
22	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Calabacita.....	60
23	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Cebolla.....	61
24	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Chile.....	61
25	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Elote.....	62
26	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Frijol.....	62
27	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Jitomate.....	63
28	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Maíz.....	63
29	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Pepino.....	64
30	Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Tomate de cáscara.....	64
31	Clasificación de temperaturas para el cultivo del ajo.....	66
32	Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Ajo.....	67
33	Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Calabacita.....	67
34	Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Cebolla.....	68
35	Localización de áreas con aptitud por precipitación para los cultivos de Chile, Jitomate y Maíz.....	68
36	Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Frijol.....	69
37	Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Pepino.....	69
38	Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Tomate de cáscara.....	70
39	Histograma del balance hídrico de la zona norte del acuífero.....	72

40	Histograma del balance hídrico de la zona centro del acuífero.....	73
41	Histograma del balance hídrico de la zona sur del acuífero.....	74
42	Histograma del balance hídrico total de las zonas norte, centro y sur.....	75
43	Relación de la Precipitación y la ETc con el periodo libre de heladas en la zona norte.....	77
44	Relación de la Precipitación y la ETc con el periodo libre de heladas en la zona centro.....	78
45	Relación de la Precipitación y la ETc con el periodo libre de heladas en la zona sur.....	79
46	Mapa de aptitud por Textura del suelo.....	80
47	Mapa de aptitud por Profundidad del suelo.....	82
48	Distribución de los tipos de suelo en la zona de estudio.....	83
49	Mapa de aptitud por Pendiente del suelo.....	84
50	Mapa de clases aptitud de suelos.....	86
51	Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica de los cultivos de Ajo, Cebolla, Chile y Pepino.....	88
52	Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica del cultivo de Calabacita.....	88
53	Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica de los cultivos de Frijol, Jitomate y Maíz.....	89
54	Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica del cultivo de Tomate de cáscara.....	89
55	Zonificación para el cultivo de Ajo.....	91
56	Zonificación para el cultivo de Calabacita.....	91
57	Zonificación para el cultivo de Cebolla.....	92
58	Zonificación para los cultivos de Chile, Jitomate y Maíz.....	92
59	Zonificación para el cultivo de Frijol.....	93
60	Zonificación para los cultivos de Jitomate y Maíz.....	93
61	Zonificación para el cultivo de Pepino.....	94
62	Zonificación para el cultivo de Tomate de cáscara.....	94

Zonificación de algunos cultivos hortícolas y básicos en el acuífero Huichapan-Tecoautla, Hidalgo

**Héctor Javier Reyes Rosas, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2015**

RESUMEN

Con el propósito de determinar zonas aptas con diferentes aptitudes para los cultivos: ajo, calabacita, cebolla, chile, frijol, jitomate, maíz, pepino y tomate de cascara, se analizó información de clima y suelo, en la región del acuífero Huichapan-Tecoautla, en el estado de Hidalgo. Se utilizaron datos diarios de clima de 27 estaciones meteorológicas distribuidas dentro y alrededor de la zona de estudio. Se definieron cuatro categorías para determinar las zonas aptas: Muy Apta, Apta, marginalmente Apta y No Apta. Para el recurso suelo, se utilizó la textura, la profundidad y la pendiente. Por la parte del factor clima se consideró la temperatura la precipitación y la evaporación. Se utilizó un sistema de información geográfica (SIG) para delimitar zonas de aptitud, lo cual facilitó la sobreposición y manipulación de capas. Los resultados indican que existen zonas con condiciones de clima y suelo favorables para la mayoría de los cultivos, excepto el tomate de cascara. Se estimó además el periodo libre de heladas y se pudo calcular el periodo de crecimiento mediante los grados días de desarrollo por zonas, el factor limitante por la parte climática es la precipitación. De acuerdo al recurso suelo se identificaron áreas con aptitud, encontrándose como factor limitante de algunas zonas la pendiente. Al realizar el álgebra de mapas entre las aptitudes climáticas y edáficas se ubicaron superficies aptas de los cultivos de interés.

Palabras clave: zonas aptas, categorías, periodo libre de heladas, grados días, álgebra de mapas.

**Zoning some horticultural and basic crops in the aquifer Huichapan-
Tecoautla, Hidalgo**

**Héctor Javier Reyes Rosas, M. Sc.
Colegio de Postgraduados, 2015**

ABSTRACT

In order to determine suitable areas with different suitabilities for crops: garlic, zucchini, onion, chilli, beans, tomatoes, corn, cucumber and tomato peel, climate and soil information was analyzed, in the region of the aquifer Huichapan-Tecoautla, in the state of Hidalgo. Daily weather data of 27 meteorological stations distributed in and around the study area were used. Four categories were defined to identify suitable areas: Very Suitable, Suitable, Marginally Suitable and Not Suitable. For the soil resource was used, texture, depth and slope. For the part of the climate factor are considered temperature, precipitation and evaporation. Geographic information system (GIS) was used to define areas of suitability, which facilitated the overlap and manipulating layers. The results indicate that there are areas where climate and soil conditions favorable for most crops, except tomato peel. The analysis of temperature showed that there is an area of 66,801 ha with suitability suitable. It was also the frost-free period is estimated and could calculate the growth period by degree days of development areas, the limiting factor for climate part is precipitation. According to the soil resource fitness areas, being a limiting factor in some areas the slope were identified. When performing map algebra between climatic and soil surfaces were located suitable surfaces crops of interest.

Key words: suitable areas, categories, frost-free period, degree days, map algebra.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura es uno de los pilares de soporte económico del país y su desarrollo tiene una prioridad vital. Sin embargo, para plantear una estrategia con el fin de lograr su desarrollo hay que determinar primeramente que partes del país deben tener atención preferencial a fin de canalizar hacia allí todos los esfuerzos técnicos y la capacidad financiera que es posible disponer.

Para determinar esas partes es necesario realizar previamente una evaluación de los recursos naturales, porque de las limitaciones para la producción que ellos presenten dependerá fundamentalmente toda la planificación para su desarrollo.

La demarcación de zonas se vuelve útil cuando las condiciones espaciales de un área lo predestinan para una actividad determinada y si la existencia de intereses diferentes en este espacio implica además conflictos potenciales. Para saberlo hay que tener un buen conocimiento del espacio o del área. Se hace un inventario de todos los factores físico-geográficos y ecológicos por un lado y de los factores socioculturales y económicos esenciales por otro lado.

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

El propósito de zonificar, es la planificación del uso de recursos naturales, para separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo. Los programas específicos pueden, entonces, formularse para proporcionar el apoyo más efectivo para cada zona.

La zonificación agro-ecológica (ZAE), de acuerdo con los criterios de FAO, define zonas en base a combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros particulares usados en la definición se centran en los requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos y en los sistemas de manejo bajo los que éstos se desarrollan. Cada zona tiene una combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de la tierra, y sirve como punto de referencia de las recomendaciones diseñadas para mejorar la situación existente de uso de la tierra, ya sea incrementando la producción o limitando la degradación de los recursos FAO (1997).

En la actualidad gracias al gran desarrollo de herramientas computacionales (programas de cómputo) y al desarrollo tecnológico, dio origen a los Sistemas de Información Geográfica, que son un medio valiosísimo para integrar muchas variables en puntos determinados en el terreno que están georeferenciados y de esta manera, es posible tener escenarios delimitados con las características específicas que les da la interacción de las variables a analizar.

En esta investigación se hizo uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para de esta forma facilitar la identificación de limitaciones ambientales para cada cultivo de estudio, los cuales son: ajo, calabacita, cebolla, chile, frijol, jitomate,

maíz, pepino y tomate de cascara y de esta forma estimar las zonas idóneas para su establecimiento en la región del acuífero Huichapan-Tecoautla de la parte occidente del estado de Hidalgo. Con base en los SIG se llevó a cabo este trabajo y se delimitaron zonas en función de variables biofísicas, climáticas y edáficas de los cultivos.

II. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1. Objetivo General

- Evaluar y ubicar zonas de aptitud para el desarrollo de cada uno de los cultivos de: ajo, calabacita, cebolla, chile, frijol, jitomate, maíz, pepino y tomate de cascara y generar mapas de zonificación que ayuden a canalizar los recursos naturales (agua y tierra), económicos y de personal, en el área del acuífero Huichapan-Tecoautla, Hidalgo.

2.2. Objetivos Particulares

- Identificar las zonas de aptitud de acuerdo a las variables de temperatura, precipitación y suelos.
- Estimar el periodo libre de heladas para el área de estudio e identificar los sitios de aptitud de acuerdo a esta variable.
- Estimar los Grados Días de Desarrollo e identificar las áreas con buena acumulación de estos para el desarrollo de los cultivos de interés.
- Generar información espacial para definir los límites territoriales con aptitud apta para hacer un uso más adecuado de la tierra.

2.3. Hipótesis

La falta de ordenamiento de las tierras para la producción de los cultivos hortícolas y básicos en el acuífero Huichapan-Tecozautla, conlleva a que su desarrollo no sea el adecuado y no se establezca en aquellas zonas donde las condiciones climáticas y edáficas sean las óptimas, y como consecuencia reducir la producción y el rendimiento de los cultivos de interés para la zona.

Mediante la ubicación de zonas de aptitud es posible mejorar la situación existente de uso de tierras, aumentando la producción y evitando la degradación de los recursos.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Zonificación

El manejo sostenible de los recursos de la tierra requiere de políticas correctas y de una planificación basada en el conocimiento de estos recursos, la demanda de sus usos y las interacciones entre ellos. Por lo tanto, en la planificación del uso de los recursos naturales, el propósito de zonificar es el de separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo. Para estos propósitos, los sistemas de información geográfica (SIG) han surgido como una poderosa herramienta para la manipulación y análisis de grandes volúmenes de datos estadísticos, espaciales y temporales, que son necesarios para generar de una forma flexible, versátil e integrada, productos de información ya sean mapas o informes para la toma de decisiones sobre el uso de los recursos de la tierra (FAO, 1997; citado por Meza y Martínez, 2004).

Desde el punto de vista de la distribución espacial y cartográfica, el objetivo principal de una zonificación de cultivos es la identificación de áreas aptas potenciales, las cuales surgen de la sobreposición espacial de información de variables tales como: suelos, clima y cultivos, clasificadas en intervalos de clases. La sobreposición simultánea genera combinaciones únicas que se manifiestan en una extensión espacial a través de un mapa resultante (Ponce, 1994; citado por Jiménez *et al.*, 2004)

Se puede decir que la zonificación es una herramienta que permite gestionar el territorio, mediante el correcto manejo de los recursos, combinando los

requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos con los estudios de suelos, definiendo zonas homogéneas que reúnen características óptimas para su desarrollo. (Lasso *et al.*, 2011).

El *Proyecto Zonas Agro-ecológicas* de (ZAE) fue un primer ejercicio en la aplicación de la evaluación de tierras a una escala continental. La metodología usada fue innovadora en caracterizar extensiones de tierra por medio de información cuantificada de clima suelos y otros factores físicos, que se utilizan para predecir la productividad potencial para varios cultivos de acuerdo a sus necesidades específicas de entorno y manejo. Las *zonas agro-ecológicas* se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, y el mismo potencial biofísico para la producción agrícola (FAO, 1997).

La primera serie de resultados del proyecto ZAE fue la aptitud de tierra estimada para 11 cultivos y tres niveles de insumos, en cinco regiones del mundo en desarrollo. Como consecuencia, en cooperación con UNFPA (Fondo de las Naciones Unidas para Actividades en materia de Población, por sus siglas en inglés) e IIASA (Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados, por sus siglas en inglés), se llevó a cabo una evaluación de la producción potencial y la capacidad de sostén de la población para las 117 naciones en desarrollo incluidas en el proyecto. Después de la presentación de los resultados de este estudio en la conferencia de FAO en 1983 se recomendó que estudios similares se emprendieran a nivel nacional. Ya entonces, FAO había estado ayudando a varios países, incluyendo a Mozambique, Kenia, China, Bangladesh, Nepal, Nigeria y Brasil, mostrándoles la metodología, y aplicando

los resultados para hacer frente a problemas de degradación de la tierra, alimentos, y población en sus provincias y distritos componentes. Investigaciones de ZAE aún más detalladas se habían llevado a cabo en áreas seleccionadas dentro de países, o en pequeñas islas como Granada (FAO, 1997).

Romo (1985) utilizó una metodología para la zonificación de cinco oleaginosas a nivel nacional, la cual requiere de conocimientos de las zonas productoras del cultivo bajo análisis, así también de datos promedio de sus respectivos rendimientos. Las zonas deben identificarse al menos en el ámbito municipal, y respecto a los rendimientos, deberán ser promedios de periodos recientes mínimos de 5 años.

Márquez (1990) realizó la zonificación de maíz de temporal en el Estado de México, utilizando las modificaciones de Ortiz (1981). A partir de la elaboración del inventario climático (temperatura, precipitación y evaporación) y del inventario edáfico (pendiente, fase y textura), en la cual se evalúa la aptitud climática y se determinan zonas con diferente nivel de aptitud para la producción de maíz en condiciones de temporal.

Jiménez *et al.*, (2004), estimaron desde el punto de vista agroecológico las zonas aptas para el cultivo de caña de azúcar en el sur del estado de Tamaulipas, México. La delimitación de las zonas las generó mediante la implementación de un sistema de información geográfica (SIG). Con base en la estimación del índice de satisfacción de las necesidades hídricas y de los grados días de desarrollo, determinó la zonificación agroclimática. Para la zonificación agroecológica clasificó información de unidades, fases, textura y pendientes del suelo, en función de la aptitud del cultivo a

estas variables y mediante la sobreposición y álgebra de mapas de estas variables se realizó la zonificación agroecológica, se delimitaron las zonas aptas potenciales para el cultivo de caña de azúcar.

Morales *et al.*, (2006) mostraron una aplicación de zonificación edafoclimática, mediante la utilización de técnicas topoclimáticas, a través de regresiones múltiples para la especialización de variables climáticas en el área de estudio y su comparación con otros métodos tradicionales de especialización, como la interpolación lineal, imágenes satelitales NOAA-AVHRR y cartografía de suelos, mediante el uso de SIG.

Martínez *et al.*, (2007) determinaron regiones agroclimáticas para el cultivo de mango “Manila” en el estado de Veracruz, México, por medio del Análisis de Componentes Principales (ACP) con variables climatológicas (temperatura, precipitación, evaporación y radiación solar).

Rivera *et al.*, (2012) realizaron la Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihotesculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México, utilizando el método de la FAO para áreas muy aptas y para una situación de alta inversión en condiciones de agricultura de temporal. Analizó cinco variables (temperatura, precipitación, altitud, fotoperiodo y periodo de crecimiento) y seis propiedades edafológicas (pH, profundidad, textura, fertilidad, salinidad y drenaje).

Pineda y Suarez (2014) Establecen que para elaborar un sistema de información geográfica destinado a la zonificación agroecológica de cultivos, se consideran los

siguientes criterios: geopedológicos (geomorfología y suelos), climatología (isoyetas e isotermas) y los requerimientos edafoclimáticos de los cultivos. Tomaron el Municipio Escuque del estado Trujillo, Venezuela, como ejemplo para el desarrollo de la investigación; a través de material cartográfico delimitaron el área y obtuvieron la información altimétrica del lugar, conjuntamente, con la suministrada por estaciones meteorológicas vecinas al municipio, la procesaron en el software *ArcGIS versión 9.3* para obtener los mapas geomorfológicos (altitud y pendiente) y los climáticos (isotermas e isoyetas); teniendo como resultado un sistema dinámico que obedece a una función matemática en la que a partir de un lenguaje estructurado de consulta a los atributos del mapa identifica las zonas óptimas para el desarrollo del cultivo del café (*Coffea*) según sus exigencias edafoclimáticas.

La Metodología más utilizada para la delimitación de zonas de aptitud de los cultivos es la que propuso FAO (1997), que de acuerdo a esta, la producción es determinada por los factores ambientales (suelo y clima) y por un complejo de factores socioeconómicos, culturales y tecnológicos. La zonificación agroecológica (ZAE) propuesta en este trabajo, define zonas con base en combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Las variables usadas en la definición se centran en los requerimientos climáticos, edáficos y de manejo del cultivo.

Tijerina y Ortiz (1990), muestran un esquema general para metodología de estudio de zonificación en el Manual de la Metodología para evaluar la Aptitud de Tierras para la producción de Cultivos Básicos, ver Figura 1. El cual, en el área de estudio se definen

las Divisiones Climáticas (en base a la temperatura) y con las cuales son posible decidir si la zona es Apta (A) o No Apta (NA) para la producción del cultivo de interés.

Si la zona resulta apta, entonces se calculan los Periodos de Crecimiento por medio de un balance hídrico que determinara el número de días con disponibilidad de agua para el cultivo. Comparando tal cantidad de días con la duración del ciclo y los rendimientos (que pueden obtenerse), se clasifican las diferentes áreas según la duración de su periodo de crecimiento en Muy Apta (MA), Apta (A), marginalmente Apta (mA) y No Apta (NA).

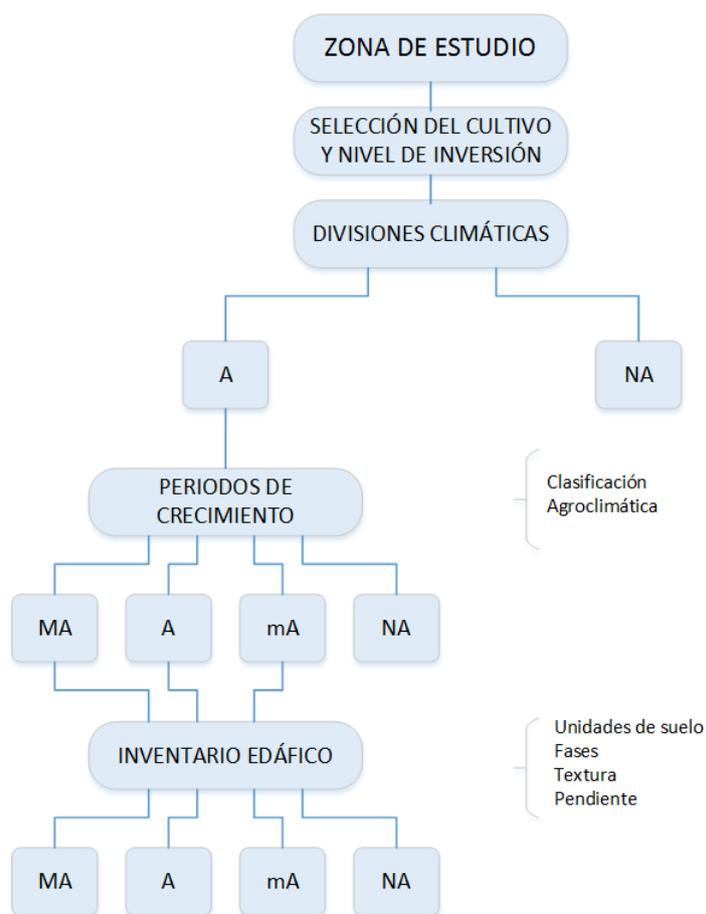


Figura 1. Metodología simplificada de la zonificación agroecológica de cultivos.

3.2. Zonificación Agroecológica (ZAE) y Los Sistemas de Información

Geográfica

Las investigaciones más avanzadas de ZAE incorporan una serie de bases de datos, enlazadas a un SIG y relacionadas con modelos computarizados, que tienen múltiples aplicaciones potenciales en el manejo de los recursos naturales y la planificación del uso de las tierras. Utilizando estas técnicas, la ZAE proporciona un marco global para la evaluación y planificación de los recursos de tierras. Sin embargo las computadoras no son esenciales para los estudios ZAE, y hay muchos excelentes ejemplos de aplicaciones usando bases de datos u hojas de cálculo comerciales y cartografía convencional (FAO, 1997).

En la última década diversas plataformas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), elaboración de métodos geoestadísticos avanzados y tecnologías en teledetección, han permitido la generación de distintas zonificaciones con mayor grado de precisión entre ellas, se conocen las realizadas en Francia para el cultivo de la vid y la producción de vinos, integrando características climáticas, edáficas y productivas en el concepto de Terroir, o las realizadas en Alemania con miras a detectar las condiciones microclimáticas a través del 'Klimaeignungskarte' (Morales *et al.*, 2006).

Los SIG son una herramienta de utilidad para identificar territorios que reúnan características deseadas para el desarrollo de cualquier actividad. El uso de estos sistemas para delimitar superficies aptas para establecer plantaciones forestales se

ha desarrollado en la última década, donde se plantean metodologías diversas, las cuales parten de la identificación de los requerimientos de las especies a ser plantadas, y finalmente se aplican procedimientos algebraicos y aritméticos espaciales en cada sistema de información utilizado (Martínez, 2008; citado por Martínez y Prieto, 2011)

Tanto las imágenes de satélite, como las ortofotos, bases de datos meteorológicas, MDE (Modelos de Elevación Digital) o cartografía de temática, proporcionan información útil sobre las variables físicas del terreno y para la selección de áreas prioritarias para plantaciones. Todos los procedimientos metodológicos para definir áreas potenciales involucran la clasificación de estas variables en función de su influencia sobre la productividad del sitio (Pinedo, 2008 citado por Martínez y Prieto, 2011)

En la actualidad se están utilizando como información primaria los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que ellos proporcionan información base fundamental al momento de poder evaluar alternativas en la utilización de los espacios. Junto con ello, la información técnica digitalizada agrupa gran cantidad de datos, además de imágenes satelitales y ayuda en el terreno de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), (Osses, 2012).

3.3. Requerimientos Agroecológicos de los cultivos

Para practicar una agricultura menos vulnerable, es necesario producir en los ambientes que satisfagan los requerimientos agroecológicos de los cultivos, ya que, producir una especie fuera de su ambiente, encarece la tecnología de producción, se reduce el rendimiento y la calidad de las cosechas. Por lo tanto, el conocer las condiciones ambientales en las zonas de producción y el conocer el ámbito geográfico en que se conjunta esa combinación de factores ambientales, adecuados para la producción de los cultivos, permitirá ubicar con precisión las zonas con mejor potencial productivo para las especies vegetales de importancia agrícola, pecuaria y forestal. Como resultado se tendrán mejores bases para la planeación y la toma de decisiones tendientes al mejoramiento de los sistemas de producción en beneficio de los productores de la región (Meza, 2001; citado por Meza y Martínez, 2004).

El diagnóstico del potencial productivo de especies vegetales consiste en identificar áreas en las que se cubran los requerimientos agroecológicos de los cultivos; es decir, definir los ambientes adecuados para los cultivos (Pereira, 1982). El procedimiento radica en cotejar las disponibilidades agroecológicas del municipio, con las necesidades de clima, suelo y topografía de las especies de uso agrícola, pecuario o forestal de interés. La selección de áreas se realiza mediante sobreposición y álgebra de mapas, realizados a través de los Sistemas de Información Geográfica IDRISI (Eastman, 1993; citado por González *et al.*, 2002)

De la Rosa *et al.* (2004) corroboran que la información de los suelos es un elemento crucial para fundamentar decisiones agrícolas realmente sostenibles; siendo la evaluación agroecológica, la interface lógica entre dicha información básica y la toma de decisiones sobre el uso y manejo de la tierra. Dentro de estas evaluaciones está incluida la zonificación por cultivos, definida por la FAO (1997), con una aplicación que combina los requerimientos climáticos y edáficos de los mismos con los estudios de suelos, para definir zonas homogéneas que reúnen características óptimas para su desarrollo (Lasso *et al.*, 2011).

3.4. Importancia de los Factores Climáticos y Edáficos

La agricultura es una actividad estrechamente relacionada con el clima, de ahí la necesidad de tener los registros climatológicos, fenológicos, agronómicos y de condiciones hídricas del suelo; que pueden ser de gran utilidad para generar bancos de información y planear la agricultura. Además de caracterizar la fenología de los cultivos y plagas, elaborar boletines para la toma de decisiones, sobre estudios de la relación clima-cultivo y construir modelos para pronosticar rendimientos y presencia de plagas y enfermedades (Villalpando y Ruiz, 1993).

3.4.1. Elementos Climáticos

Los elementos climáticos pueden definirse como toda propiedad o condición de la atmósfera cuyo conjunto caracteriza el clima de un lugar a lo largo de un período de tiempo suficientemente representativo. Igualmente definen el tiempo en un momento

determinado. Los factores del clima son aquellos que actuando conjuntamente definen las condiciones generales de una zona terrestre de extensión relativamente amplia. A continuación se enlistan los elementos más representativos del clima y su definición.

3.4.1.1. Radiación Solar

La luz del sol es la fuente primaria de energía para los ecosistemas. Esta es capturada por las plantas a través del proceso de la fotosíntesis y es almacenada entre enlaces químicos de los compuestos orgánicos; además de tener influencia sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. La energía solar transformada en calor, afecta los patrones de precipitación pluvial, los vientos, la temperatura del ambiente y la humedad atmosférica; por ello, la forma en que estos factores del ambiente se distribuyen sobre la tierra, determina el clima y es de considerable importancia para la agricultura (Smith, 1986; Coombs *et al.*, 1988; citados por Gliessman, 2000).

3.4.1.2. Temperatura

La temperatura del aire, es el grado sensible de calor, que posee el aire en un momento y lugar determinado, se debe principalmente a la radiación de onda larga que emite la superficie del planeta (Ayllón, 2013). El grado de calor existente en la atmósfera es el que recibe el nombre de temperatura atmosférica, que se origina por la influencia de la energía solar. Todos los procesos fisiológicos y funciones de las

plantas se llevan a cabo dentro de ciertos límites de temperatura. En general, la vida activa de las plantas se desarrolla entre 0° y 50 °C (Torres, 2006).

3.4.1.3. Precipitación

Ayllón (2013) define a la precipitación como la caída de agua de las nubes en estado líquido o sólido. Para que se produzca es necesario que las pequeñas gotas de la nube se unan para formar gotas más grandes que vencen la fuerza de gravedad y caigan. No toda el agua que cae llega al suelo, sino que parte queda en la atmósfera, contribuyendo a la humedad del aire; esta humedad juega un papel importante en los fenómenos atmosféricos y en general en todos los seres vivos.

3.4.1.4. Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente, si el aire mojado circundante no se transfiere a la atmósfera o en otras palabras no se retira de alrededor de la hoja. Cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, el grado de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponibles en la superficie evaporante son otros factores que afectan el proceso de la evaporación (Allen *et al.*, 2006).

3.4.2. Factores Edáficos

En los agroecosistemas es importante entender cuáles de estos factores ambientales y sus niveles pueden limitar a un organismo. Por ello, cuando se evalúa la aptitud agrícola de una cierta área y la necesidad de introducir prácticas específicas de manejo y recuperación de suelos, se deben observar una serie de características climáticas y otros aspectos relacionados con las condiciones de la tierra como la topografía y las condiciones del suelo (Gliessman, 2000 citado por FAO, 2000). A continuación se enlistan los factores más representativos del suelo y su definición.

3.4.2.1. Textura del suelo

La textura del suelo es la proporción relativa de las fracciones de arena, limo y arcilla que constituyen la masa del suelo; tiene influencia sobre el movimiento y la disponibilidad de la humedad del suelo, la aireación, la disponibilidad de nutrientes y la resistencia a la penetración por las raíces. En términos generales los suelos arcillosos son difíciles de cultivar y presentan problemas de drenaje y aireación; por el contrario, los suelos arenosos son fáciles de labrar y tienen buena aireación, pero su drenaje es excesivo, retienen poca agua, se secan con rapidez y los nutrientes se pierden por lavado. Los suelos francos son los que tienen cantidades similares de arena, limo y arcilla y se consideran los más adecuados para la agricultura, pero depende del cultivo a establecer (Gliessman, 2000; citado por FAO, 2000).

3.4.2.2. pH

La medición del pH (potencial Hidrógeno) significa medir la actividad del ion $[H^+]$ en la solución del suelo, es una medida de la acidez o alcalinidad de un suelo. El pH del suelo tiene un efecto en la disponibilidad de los nutrimentos, en la actividad de los microorganismos y en la solubilidad de minerales del suelo. En general, valores de pH entre 6.0 y 7.5 son óptimos para el crecimiento de la mayoría de los cultivos (Call, 1999; Luters y Salazar, 2000; citados por Meza y Martínez, 2004).

3.4.2.3. Salinidad

La conductividad eléctrica del suelo sirve para diagnosticar y dar una idea de la cantidad de sales solubles en el suelo, así, a mayor conductividad eléctrica mayor salinidad en la solución del suelo. Todos los suelos contienen algo de sales, las cuales son esenciales para el crecimiento de las plantas; sin embargo un exceso de sales inhibe el crecimiento de las plantas al afectar el equilibrio suelo-agua (FAO, 2000; Luters y Salazar, 2000 citados por Meza y Martínez, 2004).

3.4.2.4. Profundidad

La profundidad del suelo es muy importante porque de ella depende el volumen de agua que el suelo puede almacenar para las plantas. Un suelo de textura y estructura uniforme de 0.60 m de profundidad puede almacenar doble cantidad de agua que un suelo de 0.30 m de profundidad y también tendrá un volumen doble para las raíces de las plantas. Con frecuencia, a mayor profundidad mayor densidad aparente y

menor porosidad de tamaño medio y grande. La raíz de la planta profundizará hasta donde las condiciones de aireación y drenaje le permitan respirar adecuadamente.

3.4.2.5. Drenaje

Es la capacidad de movimiento del agua en un suelo a capacidad de campo, por lo que se mide en dichas condiciones y es función de la textura, estructura, etc. El drenaje y la descompactación incrementan la capacidad de aireación del suelo. El drenaje consiste en evacuar el exceso de agua de riego o precipitaciones con el propósito de prevenir el daño a los cultivos, evitar la acumulación de sales en el suelo o mejorar suelos potencialmente útiles para los cultivos ubicados en lugares bajos que se inundan.

3.4.2.6. Pendiente (%)

Por definición, la pendiente es la relación entre la distancia vertical (h) y la horizontal (l) en un transecto del terreno, y se expresa en porcentaje, la relación anterior se multiplica por 100: $p = (h/l)100$, esta característica tiene gran influencia en los escurrimientos superficiales, además de la importancia que tiene para los cultivos, ya que estos, requieren de cierta pendiente para su desarrollo (Becerra, 2005).

Un ángulo de 45° es una pendiente del 100%, ya que cada 100 metros en horizontal se recorren 100 metros en altura.

3.5. Grados días de desarrollo (GDD)

El concepto de unidades calor o GDD, fue determinado para expresar matemáticamente la acumulación de temperatura arriba de una temperatura umbral de un organismo dado, lo cual se traduce en desarrollo; es decir todos los organismos tienen una temperatura umbral debajo de la cual no se presenta ninguna actividad biológica de desarrollo. De esta forma el desarrollo de algunos organismos está en función de la temperatura acumulada arriba de su temperatura crítica (García, 1980).

El desarrollo de muchos organismos es controlado principalmente por la temperatura. Los días grado crecimiento ($^{\circ}D$) son una medida indirecta del crecimiento y desarrollo de plantas e insectos, y representan la integración de la temperatura ambiental entre dos temperaturas limitantes, las cuales definen el intervalo en el cual un organismo se encuentra activo. Fuera de este intervalo el organismo no presenta un desarrollo apreciable o puede morir (Ojeda, *et al.*, 2006).

La estimación diaria, i , de la variable día grado ($^{\circ}D_i$) requiere conocer la temperatura media diaria (\bar{T}_i). El valor de Grado Día se determina mediante las siguientes ecuaciones (Ojeda *et al.*, 2004):

$$\begin{aligned} \text{Si } \bar{T}_i < T_{c-max}: \quad ^{\circ}D_i &= \bar{T}_i - T_{c-min} \\ \text{Si } \bar{T}_i \geq T_{c-max}: \quad ^{\circ}D_i &= T_{c-max} - T_{c-min} \\ \text{Si } \bar{T}_i \leq T_{c-min}: \quad ^{\circ}D_i &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde T_{c-max} y T_{c-min} son las temperaturas umbrales máximas y mínimas respectivamente, expresadas en $^{\circ}C$, dentro de las cuales la planta se desarrolla.

Los grados días de desarrollo acumulados (GDDA) para n días transcurridos (ciclo vegetativo del cultivo) de $^{\circ}D$, se expresa con la siguiente ecuación:

$$GDDA = \sum_{i=1}^n {}^{\circ}D_i \quad \text{Ec. (2)}$$

El indicador (GDD) es una herramienta valiosa para el manejo de los cultivos, ya que ayuda a los productores y consultores a anticiparse a los acontecimientos biológicos que resulten en un mejor control de plagas y las decisiones en el manejo de los cultivos para minimizar los conflictos presentados tales como el riego y la aplicación de pesticidas.

Existen varios métodos para calcular los grados-días, los principales son el método del Seno Simple, Doble Seno, Triángulo Simple y Doble Triángulo.

3.6. Estimación de Heladas

El descenso de la temperatura y la ocurrencia de heladas, constituyen uno de los fenómenos ambientales que más daño causa en la vida vegetal. Las pérdidas ocasionadas por este fenómeno meteorológico son variables y dependen principalmente del estado de desarrollo de la planta y de la intensidad y duración de la helada. Los estragos que ocasiona podrían minimizarse si se conocieran a fondo las características de su distribución, formación y evolución, para así poder desarrollar mejores estrategias y técnicas de defensa en la lucha contra esta adversidad (Ruiz, 1989, citado por Medina *et al.*, 2008).

Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo (Blanc *et al.*, 1963; Bettencourt, 1980; Mota, 1981; Cunha, 1982; Citados por Snyder *et al.*, 2010); no obstante, la palabra es ampliamente utilizada por el público para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación. Los agricultores a menudo utilizan los términos “helada” y “congelación” de forma indistinta, con la definición vaga de “una temperatura del aire inferior o igual a 0 °C”.

Las heladas son fenómenos meteorológicos capaces de afectar el rendimiento, la supervivencia y la calidad de los cultivos, siendo este fenómeno uno de los mayores riesgos asociados a la producción agropecuaria. Es por ello que la información climática podría considerarse como un elemento clave para la toma de decisiones (Medina *et al.*, 2008).

Se considera la ocurrencia de heladas cuando la temperatura del aire registrada en un termómetro instalado dentro de la caseta de observaciones meteorológicas y a una altura de 1.50 m sobre el nivel del suelo, es de 0°C o inferior. Esto constituye el concepto de helada meteorológica. Sin embargo, también se puede considerar helada, a la ocurrencia de una determinada temperatura, debido a que existen cultivos que sufren las consecuencias de las bajas temperaturas sin que esta llegue a cero grados, tales como el café, las orquídeas, el cacao etc. (Romo y Arteaga, 1989 citados por Medina *et al.*, 2008).

3.6.1. Clasificación de las Heladas

Las heladas se pueden clasificar por su época de ocurrencia, por el proceso físico que les da origen y por los efectos visuales que causan sobre los cultivos (Torres, 1983; Romo y Arteaga, 1989; Matías *et al.*, 2001; citados por Medina *et al.*, 2008).

Por la época de ocurrencia se encuentran las heladas otoñales, invernales y primaverales. Por proceso físico la componen las heladas de advección, de radiación y las mixtas. Por último por efectos visuales, estas se presentan como heladas blancas y negras.

3.6.2. Daño por Heladas

El daño por heladas ocurre cuando se forma hielo dentro del tejido de las plantas, dañando sus células. Puede ocurrir en las plantas anuales (cultivos para ensilado o forrajes de gramíneas y leguminosas; cereales; cultivos para aceite o de raíces; hortalizas; y cultivos ornamentales) multi-anuales y perennes (árboles frutales caducifolios y de hoja perenne). Los daños por heladas tienen un efecto drástico para la planta entera o pueden afectar únicamente a una pequeña parte del tejido de la planta, lo cual reduce el rendimiento o deprecia la calidad del producto.

3.6.3. Grado de daños por heladas

El grado de perjuicio ocasionado por una helada depende principalmente de la fase vegetativa en la que se encuentra el cultivo durante la ocurrencia del fenómeno (Torres, 2006). En cultivos agrícolas se pueden establecer los siguientes grados de daños:

- Primer grado. Muerte de algunos órganos vegetativos como hojas y tallos tiernos; perturbación de funciones del resto de los órganos.
- Segundo grado. Destrucción de gran porcentaje de las flores y partes vegetativas.
- Tercer grado. Destrucción de frutos en formación, y deformación de los sobrevivientes.
- Cuarto grado. Muerte de toda la planta.

Torres (2006) señala que generalmente las heladas más dañinas para los cultivos son las tardías y las tempranas. Las heladas que se presentan en primavera son las que se conocen como heladas tardías y sus principales daños son destrucción de plantas pequeñas sembradas en primavera, destrucción de flores de cultivos que se siembran a finales de otoño o principios de invierno. Las heladas tempranas también producen daños importantes como reducir la calidad industrial de algunos cultivos (como la caña de azúcar) y de ciertos frutales (como aceitunas).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización y descripción de la zona de estudio

La zona que conforma el Acuífero Huichapan-Tecoautla se ubica geográficamente en la parte poniente del estado de Hidalgo (Figura 2), entre las latitudes $20^{\circ} 15' 41''$ y $20^{\circ} 40' 45''$ N y las longitudes $99^{\circ} 29' 46''$ y $99^{\circ} 47' 20''$ W, a una altura promedio de 2100 msnm. Se presenta un clima templado frío, con una temperatura anual promedio de 16° C; precipitación pluvial media de 550 a 650 mm por año, con un periodo de lluvias en los meses de mayo a septiembre. Su suelo es rico en materia orgánica y nutrientes, el uso principal de la tierra es agrícola y de agostadero, le sigue el forestal como los pastos naturales, bosque o selva. En cuanto a suelos, predominan: el feozem, el vertisol, planasol y rendzina.

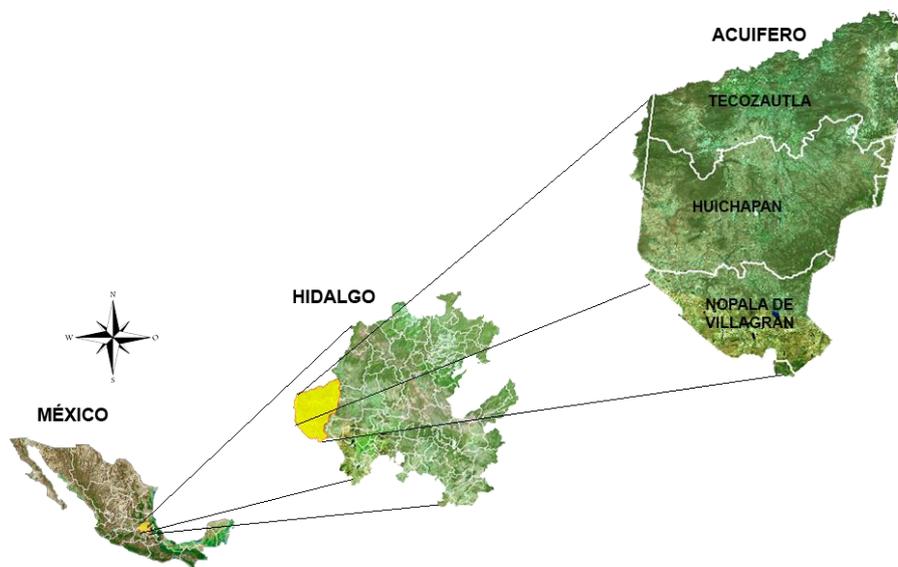


Figura 2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

La zona de estudio está constituida por los municipios de: Huichapan, Tecozautla y Nopala, los cuales representan entre los tres una superficie total de 1577.7 Km², como se muestra a continuación en el siguiente Cuadro 1.

Cuadro 1. Municipios que integran la zona de estudio y superficie que representan

Municipio	Superficie (Km²)	% que representa en el estado
Huichapan	668.10	3.19
Tecozautla	334.00	1.59
Nopala	575.60	2.75
Subtotal	1,577.70	7.54
Total Estatal	20,905.12	100

4.1.1. Selección de la información climatológica

Para la realización de esta investigación se integró una base de datos climatológicos diarios, estos se extrajeron del programa ERIC 3.2 (Extracción Rápida de Información Climática) (IMTA, 2009) reportando un número de 27 estaciones meteorológicas, distribuidas dentro y alrededor de la zona de estudio, de las cuales solo 4 se localizan dentro de la zona (Figura 3). Todas las estaciones con un periodo de observación mínimo de 20 años.

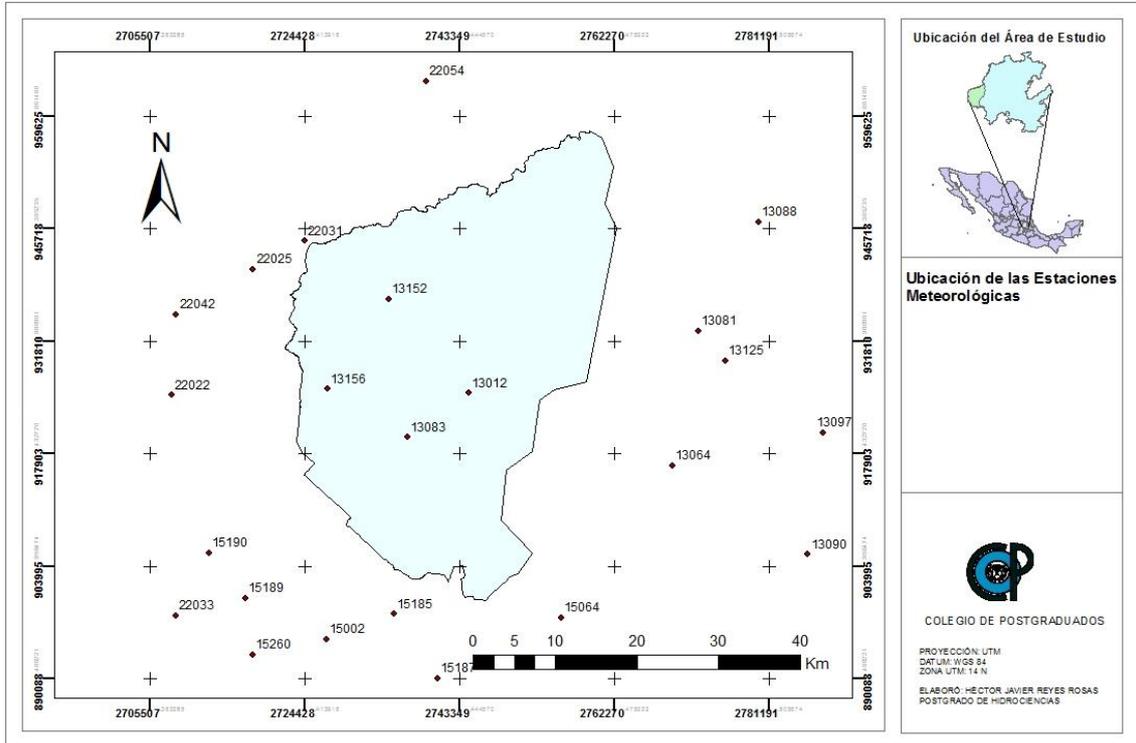


Figura 3. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas.

En el Cuadro 2 se muestra la lista y coordenadas de las estaciones meteorológicas seleccionadas, la información de los datos fue obtenida del programa antes mencionado (ERIC 3.2).

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas seleccionadas

Clave de estación	Estación Meteorológica	Entidad Federativa	Temp. Med. Anual. (°C)	Precipitación (mm)	Altitud (m)	Latitud	Longitud
013012	Huichapan	Hidalgo	15.55	436.8	2120	20.3714	-99.6489
013064	Chapantongo	Hidalgo	14.14	549.6	2120	20.2869	-99.4103
013081	Presa golondrinas	Hidalgo	11.35	435.6	1864	20.4361	-99.3764
013083	Presa madero	Hidalgo	14.81	516.5	2172	20.3233	-99.7217
013088	Tasquillo	Hidalgo	17.55	336.4	1654	20.5561	-99.3036
013090	Rio salado	Hidalgo	17.41	462.8	2000	20.1853	-99.2528
013097	Chilcuautila	Hidalgo	16.42	329.7	1854	20.3208	-99.2317
013125	Alfajayucan (dge)	Hidalgo	15.66	359.8	1875	20.4025	-99.3458
013148	Xitha	Hidalgo	13.08	-	2081	20.6350	-99.3336
013152	El potrero	Hidalgo	13.27	425.0	1880	20.4772	-99.7411
013156	Tlaxcalilla	Hidalgo	15.96	511.3	2200	20.3786	-99.8142
015002	Aculco (smn)	México	11.71	670.1	2490	20.1000	-99.8200
015064	Oxthoc	México	15.06	704.8	2353	20.1197	-99.5444
015185	Presa el molino	México	12.23	696.1	2493	20.1269	-99.7406
015187	Presa huapango	México	11.10	825.5	2640	20.0544	-99.6903
015189	La concepción	México	12.19	762.4	2351	20.1467	-99.9147
015190	Presa san Ildefonso	México	16.16	757.0	2290	20.1975	-99.9564
015192	Taxhie	México	16.44	-	2260	20.2256	-99.8892
015217	San juan acazuchitlan	México	11.16	-	2605	20.1400	-99.6025
015260	San Lucas totolmaloya	México	11.02	726.4	2737	20.0842	-99.9069
022022	San juan del rio (dge)	Querétaro	18.55	474.1	1933	20.3742	-99.9983
022025	Presa centenario	Querétaro	19.28	406.1	1889	20.5131	-99.9000
022028	Galindo	Querétaro	18.80	-	1937	20.3931	-100.0942
022031	Presa paso de tablas	Querétaro	18.05	481.9	1903	20.5436	-99.8392
022033	San pablo	Querétaro	14.71	824.2	2404	20.1283	-99.9967
022042	La llave	Querétaro	17.93	390.0	1894	20.4642	-99.9914
022054	El salitre	Querétaro	18.83	270.3	1981	20.7192	-99.6925

4.1.2. Gradiente Térmico

La altitud o elevación sobre el nivel del mar del suelo influyen en la temperatura media, debido a la variación de la densidad de la atmosfera con la altitud. Por lo tanto la temperatura disminuye con la altitud, sin embargo, al aumentar la altitud aumenta la amplitud térmica diaria: de noche hay menos efecto invernadero y de día, al ser el

aire menos denso, hace falta menos calor para elevar la temperatura del aire (Zúñiga y Crespo, 2010).

La compresión o expansión que sufre el aire también influye en la variación de la temperatura. Si se comprime un gas, el trabajo mecánico de la compresión se convierte en calor y produce un aumento de temperatura. Si el gas se expande, gasta una parte de su propio calor en forma de trabajo, por lo cual disminuye su temperatura.

Cuando un volumen de aire asciende va disminuyendo su presión y, por tanto, se expande y enfría. Si desciende, se comprime y aumenta su temperatura (proceso adiabático). El valor del gradiente térmico de estas variaciones con la altura depende de varias circunstancias; entre ellas la temperatura, la liberación de calor latente por condensación del vapor de agua y velocidad con que se mueve el aire. En promedio se calcula un gradiente de 6 °C/km de altura (Ayllón, 2013).

En la Figura 4 se aprecia el comportamiento del gradiente térmico de la zona de estudio en la cual se observa que la temperatura media anual (°C) disminuye cuando aumenta la altura (msnm), además de que se puede observar también como existen datos atípicos los cuales vemos que se alejan de la mayoría de otros datos y que la correlación que existe es relativamente baja ya que presenta un $R^2=0.47$.

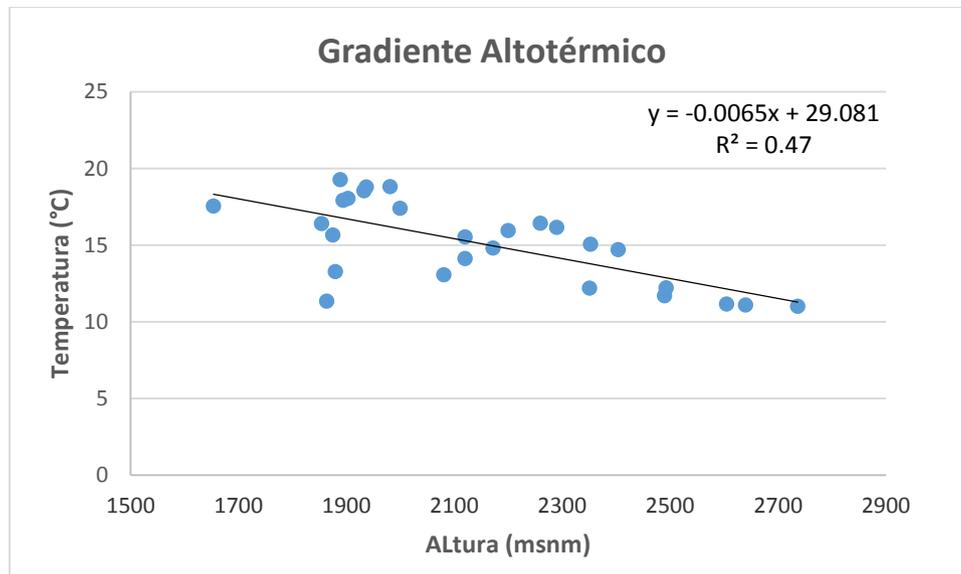


Figura 4. Comportamiento del gradiente térmico en la zona de estudio

4.1.3. Características ambientales de la zona de interés

4.1.3.1. Clima

El clima tiene una gran influencia en la vida de los seres vivos. Los factores climáticos hacen que en la naturaleza existan diferentes ambientes en los cuales se desarrolla la vida vegetal, animal y humana.

En las nuevas teorías sistémicas, el clima es concebido como un sistema que se mantiene en el espacio y el tiempo gracias al intercambio de energía que se produce a nivel de la superficie terrestre, mediante la circulación general del aire. El funcionamiento de este sistema climático se circunscribe a las relaciones entre la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y la biósfera (Ayllón, 2013).

El clima que se encuentra en la zona de estudio y que impera en la región es un clima semi-árido templado, con una temperatura media anual entre 12° y 18°C (BS1 kw), luego en la parte Norte (zona regional de Tecozautla) el clima cambia muy poco a un clima semi-árido, semi-cálido con una temperatura media anual mayor de 18°C (BS1 hw) y en la parte sur, en la parte montañosa de la región (Nopala), se presenta un clima del tipo C (w1) que corresponde a un clima templado, subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12° y 18°C y lluvias de verano con índice P/T (Precipitación/Temperatura) menor de 43.2, posteriormente en menor proporción se encuentra el C (w0) que corresponde a un clima templado, subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12° y 18° y lluvias en verano con índice P/T entre 43.2 y 55, (García, 2004) ver Figura 5.

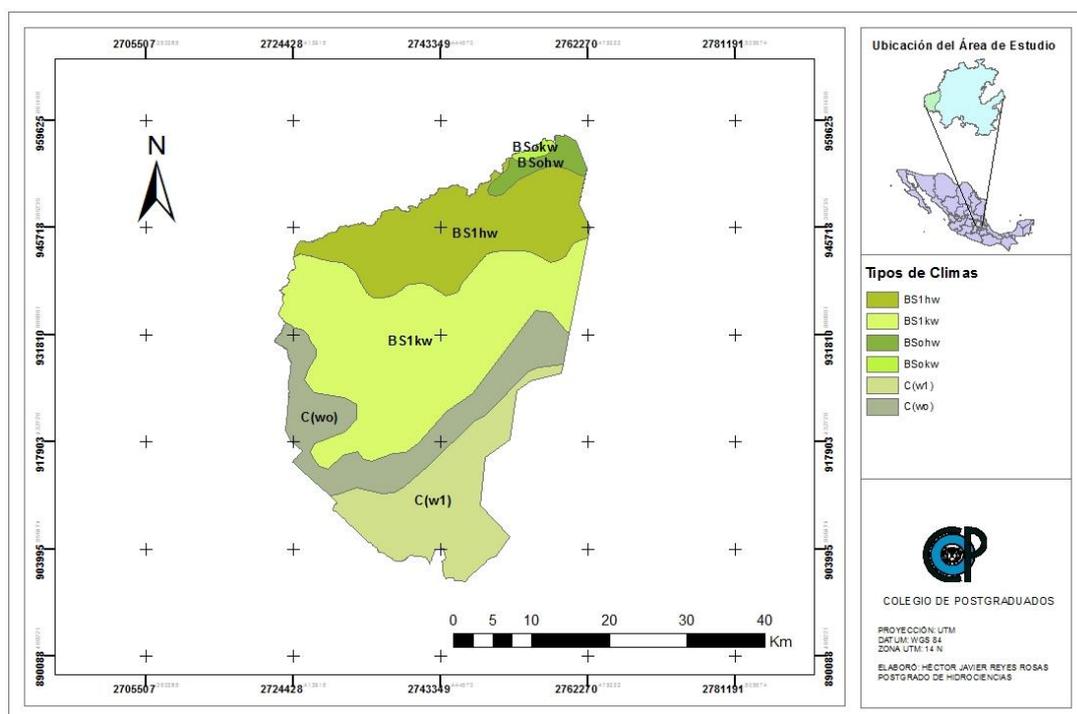


Figura 5. Distribución de climas en la zona de estudio. INEGI, 2005.

4.2. Especies de interés en la zona de estudio

Las especies de interés de la zona de estudio corresponden a las prioridades de información manifestada en su oportunidad por la autoridad del comité técnico de aguas subterráneas (COTAS), las que se muestran a continuación en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Especies de interés para la investigación

Especie	Nombre común	Familia
<i>Allium sativum L.</i>	Ajo	<i>Liliaceae</i>
<i>Cucurbita pepo L.</i>	Calabacita	<i>Cucurbitaceae</i>
<i>Allium cepa L.</i>	Cebolla	<i>Liliaceae</i>
<i>Capsicum frutescens L.</i>	Chile	<i>Solanaceae</i>
<i>Phaseolus vulgaris L.</i>	Frijol	<i>Fabaceae (Leguminosae)</i>
<i>Lycopersicum esculentum Mill.</i>	Jitomate	<i>Solanaceae</i>
<i>Zea Mays L.</i>	Maíz	<i>Poaceae</i>
<i>Cucumis sativus L.</i>	Pepino	<i>Cucurbitaceae</i>
<i>Physalis ixocarpa L.</i>	Tomate de cascara	<i>Solanaceae</i>

4.2.1. Descripción de los requerimientos de cultivo

A continuación se presenta a manera de ejemplo los requerimientos del cultivo del ajo y en el Anexo I se presenta los requerimientos de los demás cultivos.

Ajo *Allium sativum L.*

El Ajo pertenece a la familia *Liliaceae*, su origen radica en Asia Central, se adapta en las regiones templadas, trópicos y subtrópicos. Su ciclo vegetativo oscila entre los 140-160 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

Fotoperiodo: El ajo es de fotoperiodo corto después de la inducción floral, mediante bajas temperaturas favorecen la iniciación de la inflorescencia, mientras que un fotoperiodo largo la limitan. Sin embargo, las temperaturas modifican significativamente este efecto fotoperiódico.

Altitud: Se puede encontrar entre los 600-1800 msnm

Precipitación: Se cultiva bajo riego pero puede prosperar en regiones con una precipitación anual entre 450 y 1000 mm. Es una especie bastante tolerante a la sequía, sin embargo, no le debe faltar el agua en las etapas de germinación y formación de bulbos.

Humedad: Es un cultivo que prefiere una atmosfera seca.

ambiental

Temperatura: La temperatura mínima para crecimiento está entre 4 y 8°C, mientras que la temperatura crítica de helada es de -1°C. En etapas tempranas de desarrollo le son favorables temperaturas de entre 8–16°C para el brote y formación de bulbos. Después de la inducción de bulbos, temperaturas de entre 18 y 20°C son favorables para el crecimiento del bulbo; la temperatura máxima durante éste periodo no debe ser superior a los 30°C. Para el logro de buenos rendimientos, la media óptima está alrededor de los 18°C, con una máxima que no debe superar los 26°C. Para una

buena germinación, los “dientes” que se utilizan como material de propagación deberían mantenerse, el mes antes de la siembra, a temperaturas de 0-10°C. El punto de congelación es de -5°C, alcanzándose el crecimiento cero a 5°C; la mínima, óptima y máxima para desarrollo son 6, 10-20 y 35°C respectivamente. Para el brote las temperaturas mínima, óptima y máxima son 6, 20-22 y 30°C respectivamente.

Salinidad: Se desarrolla en suelos calcáreos y es moderadamente tolerante a la salinidad.

pH: Se desarrolla en un pH que varía desde 5 a 7.5.

Drenaje: Requiere de un buen drenaje, ya que es una especie que no tolera encharcamientos.

A continuación se muestra de manera resumida los requerimientos climáticos y edáficos de cada uno de los cultivos de estudio en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos de interés

Cultivo	Temp. mín- máx (°C)	Temp. Óp. (°C)	Precip. mín- máx (mm)	Precip. Óp. (mm)	Textura Óp.	Profund. Óp. (cm)	Profund. min (cm)	Pendiente Óp. (%)	Fecha de siembra	Fecha de cosecha
Ajo	6-35	18-26	500-2700	750-1600	Gruesa, Media	50-150	20-50	0 - 4	01-ago	05-ene
Calabacita	7-30	20-25	300-2800	600-1500	Media	50-150	20-50	0 - 4	10-ene	24-mar
Cebolla	5-35	15-20	300-2800	350-600	Media	50-150	20-50	0 - 4	01-oct	01-may
Chile	7-29	16-20	400-2000	600-1500	Media	50-150	20-50	0 - 4	10-ene	10-may
Frijol	10-30	16-24	300-4300	500-2000	Media	50-150	20-50	0 - 4	01-jun	25-sep
Jitomate	10-35	16-20	400-1800	600-1300	Media	50-150	20-50	0 - 4	01-may	20-ago
Maíz	10-30	18-24	400-1800	600-1200	Media	50-150	20-50	0 - 4	01-feb	15-jun
Pepino	10-35	18-25	400-4300	1000-1200	Media	50-150	20-50	0 - 4	01-jun	05-nov
Tomate de cáscara	12-32	19-25	600-1100	700-1000	Media	50-150	20-50	0 - 4	05-ene	01-abr

Fuente: FAO (1994) y Ruiz *et al.*, (1999). Abreviaturas: Temp. mín-máx= Temperatura mínima y máxima; Temp. Op.= Temperatura Óptima; Precip. mín-máx;= Precipitación mínima y máxima; Precip. Óp. Precipitación Óptima; Textura Óp.= Textura Óptima; Profund. Óp. =Profundidad Óptima; Pendiente Óp.= Pendiente Óptima.

En el Anexo 1 se muestra la información más relevante de las otras especies estudiadas, como se muestra en los párrafos anteriores del cultivo de ajo.

4.3. Metodología

Para la delimitación de las zonas de aptitud, se realizó la zonificación de cultivos utilizando las tecnologías de los sistemas de información geográfica.

Las áreas con determinada aptitud (MA, A y mA) son analizadas primero por la parte climática, posteriormente, por unidades de suelo: profundidad, textura y pendiente. Si todo eso es favorable para el desarrollo del cultivo, la clasificación agroclimática no cambiara, pero si existen restricciones en alguno o en varios de los factores considerados, entonces la clasificación agroclimática se va demeritando.

La metodología consiste en ubicar zonas de aptitud para el desarrollo de los cultivos antes mencionados, tomando en cuenta las variables climáticas, edáficas y biofísicas, para de esta forma demeritar aptitudes de Muy Apto (MA) a No Apto (NA).

4.4. Estimación de las medias de Temperaturas máximas y mínimas

Con base en los datos diarios que se extrajeron del programa ERIC 3.2 se calcularon los promedios mensuales y anuales de temperatura para cada una de las estaciones seleccionadas en la zona de interés.

Para la estimación de las temperaturas máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}) se promedian los datos diarios para cada mes del año, la temperatura mensual promedio se obtuvo de la suma de las temperaturas mensuales y se dividieron entre el número de años del periodo.

$$T_{med} = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

T_{med} = temperatura media diaria (°C)

T_{max} = Temperatura máxima diaria (°C)

T_{min} = Temperatura mínima diaria (°C)

El cálculo de las medias de temperaturas medias mensuales (T_{mmed}) y anual (T_{ma}) se realizó de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$T_{mmed} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{med}}{n} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

T_{mmed} = Temperatura media mensual (°C)

n = Número de días del mes

$$T_{ma} = \frac{\sum_{i=1}^{12} T_{mmed}}{12} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

T_{ma} = temperatura media anual (°C)

n = Número de meses del año

$$T_{pau} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ma}}{n} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

T_{pau} = Temperatura promedio del número de años utilizados (°C)

n = Número de años

4.5. Periodo Libre de Heladas

Para la realización de esta investigación se integró un conjunto de datos climatológicos diarios, estos se extrajeron del programa ERIC (Extracción Rápida de Información Climatológica) (IMTA, 2013) reportando para la estimación de esta variable 27 estaciones meteorológicas, sin embargo para la del periodo libre de heladas, solo se seleccionaron 23 ya que el resto de las estaciones presentaron inconsistencia en los datos (Falta de registros de datos). Partiendo de las estaciones meteorológicas seleccionadas se generó un conjunto de datos históricos a nivel diario de temperatura mínima (periodo de 20 años).

Para la estimación del periodo libre de heladas se utilizó la hoja de cálculo FriskNH.xls (Snyder y De Melo-Abreu, 2003), la cual es utilizada para estimar probabilidades de la última helada en primavera, la primera en otoño y la probabilidad de menos días en la estación de crecimiento usando datos diarios de temperatura mínima (Figura 6)



Figura 6. Interfaz de la hoja de cálculo FriskNH

Para ello se introdujeron datos diarios de temperatura mínima de un periodo de 20 años para cada estación meteorológica seleccionada en la hoja “data” (Figura 7), sin embargo además de los datos diarios se introduce una temperatura crítica para la cual se utilizó una $T_c = 2.0$ °C, debido a que existen cultivos que sufren las consecuencias de las bajas temperaturas sin que esta llegue a cero grados. Ruiz, (2008) citado por Medina *et al*, (2008), menciona que además del concepto de helada meteorológica, se puedan manejar otros dos conceptos: helada biológica y helada agronómica. La diferencia entre estos dos conceptos es que la helada biológica implica daño a los tejidos de las plantas, mientras que la helada agronómica significa que además del daño a las plantas, implica pérdidas económicas

		Enter the year number in the light-gray highlighted row. Enter the minimum recorded temperature in the column the correct year corresponding to the date in column A. Leave blank or input an * for missing data.											
		Critical Temperature											
		2.0											
Leap Year		YR 1	YR 2	YR 3	YR 4	YR 5	YR 6	YR 7	YR 8	YR 9	YR 10	YR 11	YR 12
DATE	DOY	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
01-ene	1	1	1	4	5	4	5	2	2	5	1	0	5
02-ene	2	1	2	4	5	4	5	5	5	5	3	1	5
03-ene	3	1	4	4	5	4	5	5	2	5	6	1	3
04-ene	4	1	5	5	6	5	5	5	7	5	6	4	5
05-ene	5	7	5	5	6	5	4	5	4	1	3	3	5
06-ene	6	1	6	4	6	4	4	5	4	1	1	5	5
07-ene	7	3	6	5	6	4	5	3	3	1	1	3	5
08-ene	8	2	6	3	6	2	6	7	3	1	1	0	5
09-ene	9	4	6	2	6	2	6	4	2	1	1	0	2
10-ene	10	1	9	2	6	2	6	5	1	1	1	0	3
11-ene	11	2	5	2	6	2	7	4	2	1	1	1	3
12-ene	12	1	1	2	7	2	7	6	1	3	3	1	3
13-ene	13	2	3	2	7	2	7	4	2	5	4	1	2
14-ene	14	1	4	2	7	2	6	1	6	5	0	1	2
15-ene	15	0	5	2	7	2	6	4	6	0	0	1	3

Figura 7. Hoja “data” para la introducción de los datos diarios y Temperatura crítica

4.6. Cálculo de los Grados Días de Desarrollo (GDD)

Para el cálculo de los GDD se utilizó el método de seno simple, ya que según la Metodología para el cálculo de Unidades Calor diseñada por la University of California, Agriculture and Natural Resources, este método trigonométrico ajusta algunas funciones seno a las temperaturas máximas y mínimas diarias. Mediante esta

metodología se han corregido errores encontrados en otros métodos utilizando umbrales máximos y mínimos ver Figura 8.

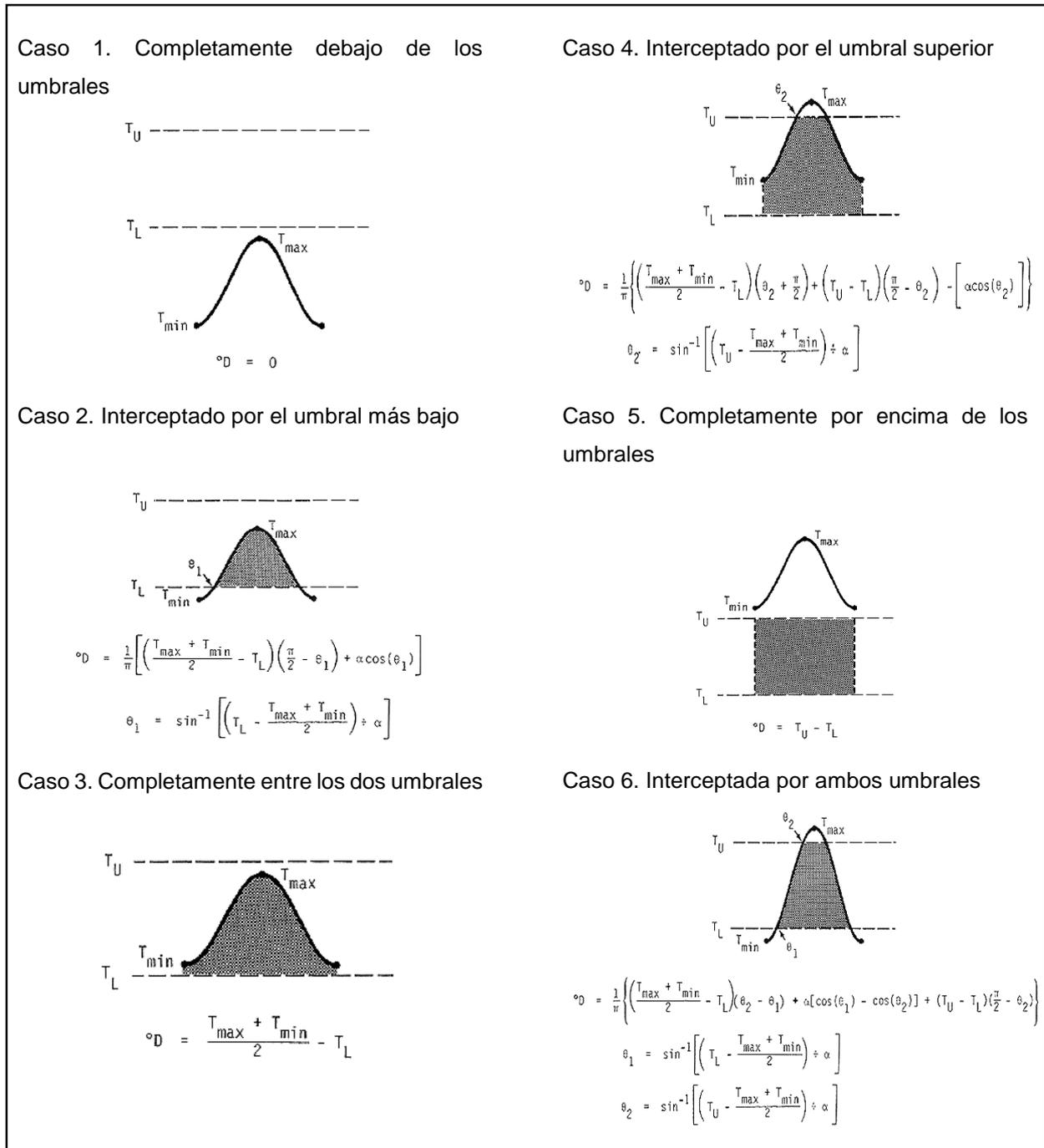


Figura 8. Casos del Método del seno simple

Donde:

TU= Temperatura Umbral Superior (°C)

°D= Grados Días

TL= Temperatura Umbral Inferior (°C)

O₁= Amplitud de la función seno inferior (°)

Tmax= Temperatura máxima (°C)

O₂= Amplitud de la función seno superior (°)

Tmin= Temperatura mínima (°C)

Para la estimación de los GDD se utilizó el la hoja de cálculo en DegDay en Excel (Figura 9), que ayuda a agilizar la estimación de los grados días utilizando el método del triángulo y el del seno simple (Snyder, 2005).

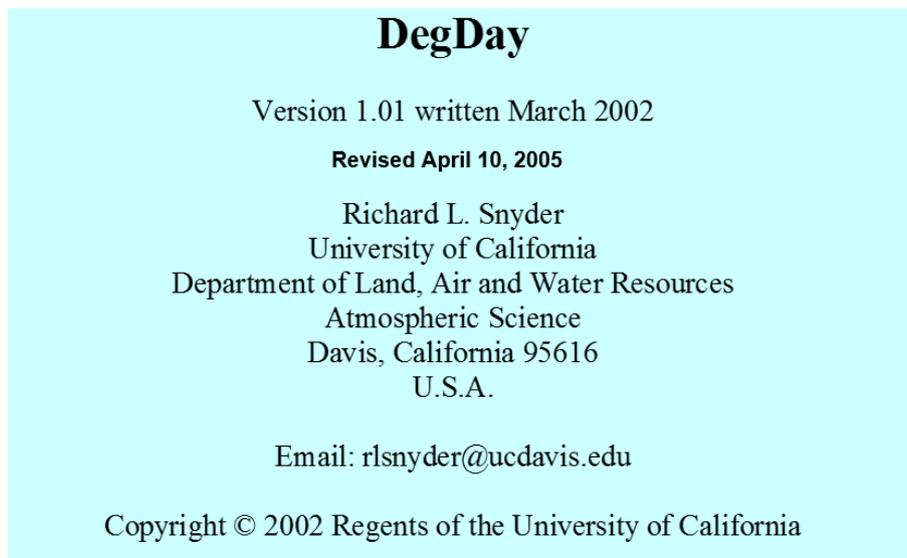


Figura 9. Interfaz del programa DegDay

Para la utilización de esta hoja de cálculo se introducen las temperaturas umbrales inferior y superior de determinada especie (Figura 10), posteriormente se introducen las temperaturas máximas y mínimas diarias de un mínimo de 2 años (Figura 11), de esta forma la hoja de cálculo estima los grados días utilizando los métodos del triángulo y seno simple.

T_{low}	T_{high}
6.0	35.0
Input	Input
T_{low}	T_{high}

Figura 10. Introducción de las temperaturas umbrales inferior y superior del cultivo de interés

Sample Number	Temperature Data	
	T_{max}	T_{min}
1	15	5
2	16	0
3	13	1
4	12	0
5	17	0
6	17	-3
7	20	-2
8	17	-2
9	14	3
10	15	5
11	16	1

Figura 11. Introducción de las temperaturas máximas y mínimas diarias

4.7. Precipitación

Al igual que la temperatura, la información de la precipitación fue extraída del programa ERIC 3.2.

Para la estimación de la precipitación promedio mensual se sumaron los datos diarios para cada mes del año, posteriormente la precipitación anual se obtuvo a partir de la suma de la precipitación mensual de cada año, por último las precipitaciones anuales se sumaron y se dividió entre el número de años o periodo años de observación.

4.7.1. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP)

Para la estimación de la Evapotranspiración Potencial (ETP) se utilizó el método del tanque evaporímetro tipo A, ya que pueden expresarse a datos de ETP mediante la ecuación que a continuación se presenta (Doorenbos y Pruitt, 1977; citado por González *et al.*, 2012).

Los datos de evaporación utilizados, fueron extraídos de los registros del programa ERIC 3.2, ya que de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-166/1-SCF1-2013 (2013), este tipo de evaporímetro es el más usado internacionalmente y es el que se encuentra en las estaciones meteorológicas. Para este caso se utilizó un coeficiente del tanque de 0.8, mismo que depende de la velocidad del viento y humedad relativa de la zona, de acuerdo a la tabla de coeficientes del tanque evaporímetro Tipo A en FAO 56 (Allen *et al.*, 2006).

$$ETP = k_p * E_v \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

ETP = es la evapotranspiración potencial (mm)

K_p = es el coeficiente de ajuste del tanque (adimensional)

E_v = evaporación medida mensualmente (mm)

4.8. Estimación de la Pendiente

Cuando se mide una distancia en el mapa se hace sobre una superficie plana. La que se mide en el mapa se llama distancia planimétrica, que no es otra cosa que la proyección en el mapa de la distancia real. La distancia planimétrica coincide con la

real sólo si en la realidad hay una llanura, pero si hay una pendiente la diferencia entre la distancia real y la planimétrica puede ser notable.

Las unidades de pendientes se generaron a partir del DEM (Modelo de Elevación Digital) y que a su vez se generó a partir de las curvas de nivel obtenidas del INEGI con una escala de 1:250 000 (capa vectorial) para la zona de estudio, este mapa se realizó en ArcGis 10.0.

4.9. Análisis espacial

Las capas de los diferentes factores edáficos como lo son la textura, profundidad y pendiente del área de estudio se generaron del Sistema de Información edáfica del INEGI (2005). La aptitud de los suelos para los cultivos de interés fue elaborada para cada uno de los factores antes mencionados, además de que esas capas (vectores) se utilizaron posteriormente para el análisis espacial, para de esta forma determinar la aptitud de la tierra para cada cultivo.

El análisis espacial para la obtención de las zonas de aptitud se realizó con base en la intersección de las capas o coberturas generadas de los factores edáficos, y climáticos para el desarrollo de los cultivos de interés.

La primer variable que se consideró fue la textura, ya que está relacionada directamente con el desarrollo de las plantas, además de que afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la regulación del drenaje superficial y la reserva de agua en el suelo.

La segunda variable que se estudió fue la profundidad del suelo, ya que dependiendo del espesor del material edáfico el cultivo se verá más favorable para la penetración de las raíces de las plantas. Un suelo con buen drenaje de texturas y estructuras deseables son adecuados para la producción de cultivos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Zonificación por Temperatura

Todos los procesos fisiológicos y funciones de las plantas se llevan a cabo dentro de ciertos límites de temperatura. En general la vida activa de las plantas se localiza entre 0° y 50°C, aun cuando estos límites varían mucho de una especie a otra. En el Cuadro 2, visto anteriormente en la metodología, se presenta la Temperatura promedio de cada una de las 27 estaciones meteorológicas seleccionadas para dicho estudio, el cual nos sirvió para poder realizar los mapas referentes a la zonificación por temperatura.

Las clasificaciones se obtuvieron de la siguiente manera: para el caso del cultivo del ajo se inició a partir de las temperaturas óptimas que se encuentran entre los 18°-26° C y de las temperaturas mínima y máxima con un rango de 7°-35° C, para la clasificación de Muy Apta se tomó la temperatura optima, para el caso de la clasificación Apta y marginalmente Apta se obtuvo a partir de dividir el rango entre la temperatura mínima (7°C) y la óptima mínima (18°C) dando como resultado el parámetro de 12.5°C. De la misma forma se hizo para la temperatura máxima (35°C) y la óptima máxima (26°C) de la cual se obtuvo 30.5°C, como se puede observar en la Figura 12.

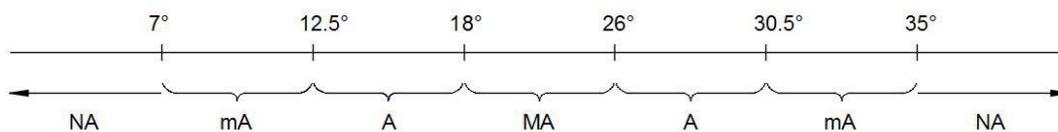


Figura 12. Clasificación de temperaturas para el cultivo del ajo

Para los demás cultivos se realizó la misma metodología para obtener sus clasificaciones, como se muestra a continuación en el Cuadro 5

Cuadro 5. Clasificación de temperaturas de acuerdo a su requerimiento térmico de los cultivos de interés en °C.

Cultivos	MA	A	mA	NA
Ajo	18-26	>12.5 - <18 y >26 - <30.5	>7 - <12.5 y >30.5 - <35	< 7 - > 35
Calabacita	20-25	>13.5 - <20 y >25 - <30	>7 - <13.5 y >30 - <35	< 7 - > 35
Cebolla	15-20	>10 - <15 y >20 - <27.5	>5 - <10 y >27.5 - <35	< 5 - > 35
Chile	16-20	>11.5 - <16 y >20 - <24.5	>7 - <11.5 y >24.5 - <29	< 7 - > 29
Elote y Maíz	16-20	>13 - <16 y >20 - <25	>10 - <13 y >25 - <30	< 10 - > 30
Frijol	16-24	>13 - <16 y >24 - <27	>10 - <13 y >27 - <30	< 10 - > 30
Jitomate	16-20	>13 - <16 y >20 - <27.5	>10 - <13 y >27.5 - <35	< 10 - > 35
Pepino	18-25	>14 - <18 y >25 - <30	>10 - <14 y >30 - <35	< 10 - > 35
Tomate De Cáscara	18-25	>15 - <19 y >25 - <28.5	>12 - <15 y >28.5 - <32	< 12 - > 32

En las Figuras 13 a la 18, se presentan los mapas obtenidos a partir de las temperaturas promedio de cada estación, en las cuales se muestra la distribución espacial de ésta y como es que cada cultivo se ubica de acuerdo a su requerimiento térmico. Las interpolaciones se realizaron en Arc Map 10.0 por el método IDW (Inverse Distance Weighting), que significa método de distancia inversa. García (2006) menciona que es el método menos complejo, y es el que mejores resultados aporta a la vista. Desde el punto de vista metodológico, cada valor que tiene una

correspondencia con un punto determinado, influye sobre los demás de forma local y disminuye proporcionalmente su efecto con la distancia. Al ser un método exacto y ajustarse en su localización a los datos, en ocasiones genera en el mapa círculos concéntricos, denominados “bull-eyes” (ojos de toro), que gradúan los cambios bruscos en los valores.

Como se puede observar en el Cuadro 5, para el caso del cultivo del ajo y el pepino, sus requerimientos térmicos son similares, por lo tanto se representan los dos en la Figura 13, en la cual se aprecia que la mayoría del área es Apta (A) de acuerdo a la clasificación presentada y muy poca es marginalmente apta (mA). Para el caso del cultivo de calabacita (Figura 14) y de acuerdo a los requerimientos de temperatura, el área A es muy similar a la del cultivo del ajo y el pepino, sin embargo el área de mA se incrementa un poco. Para el cultivo de cebolla en la Figura 15 y con base en el Cuadro 5, se pudo observar que gran parte de la zona de estudio es MA y A. En tanto en la Figura 16 que corresponde al cultivo de chile y a los requerimientos térmicos (mismo caso que el ajo y el pepino), presenta la gran mayoría de la zona como una zona Apta para dichos cultivos y una pequeña área de Muy Apta. Para el caso del frijol, jitomate y maíz (Figura 17) presenta una pequeña área Muy Apta y en mayor proporción una zona Apta y mA en menor proporción. Por último en la Figura 18, correspondiente al cultivo de tomate de cáscara, presenta el área en su mayoría una zona mA y en una proporción menor una pequeña área Apta.

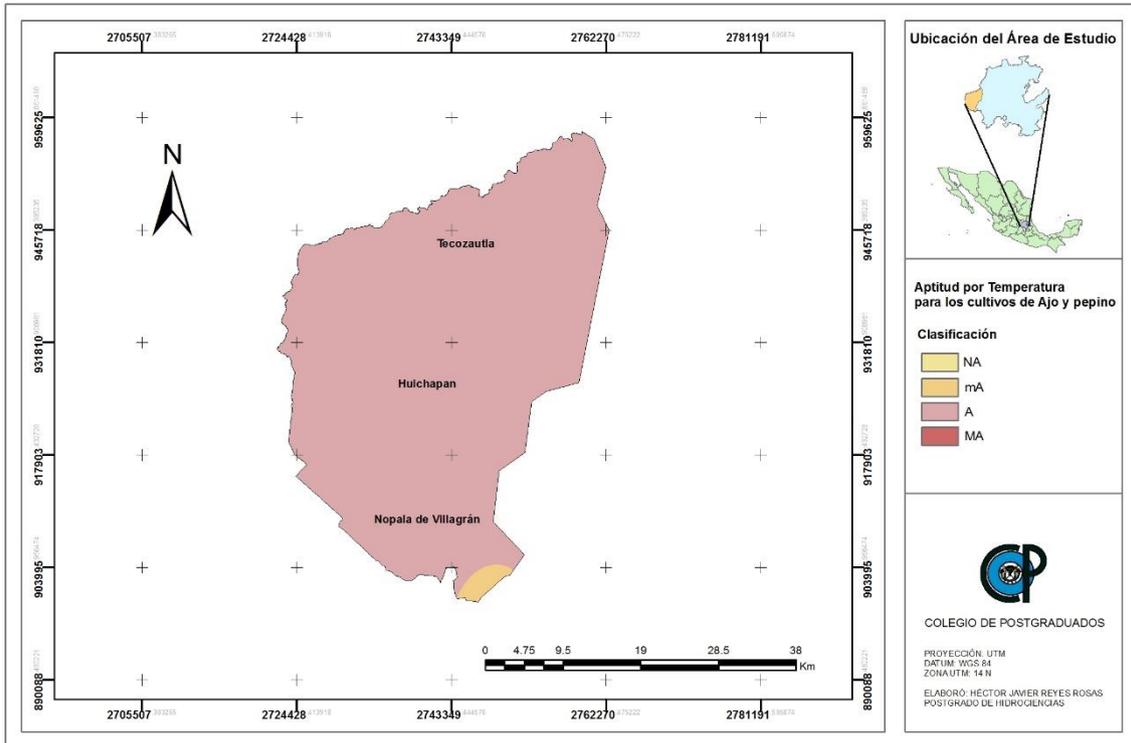


Figura 13. Localización de áreas con aptitud térmica para los cultivos de Ajo y Pepino.

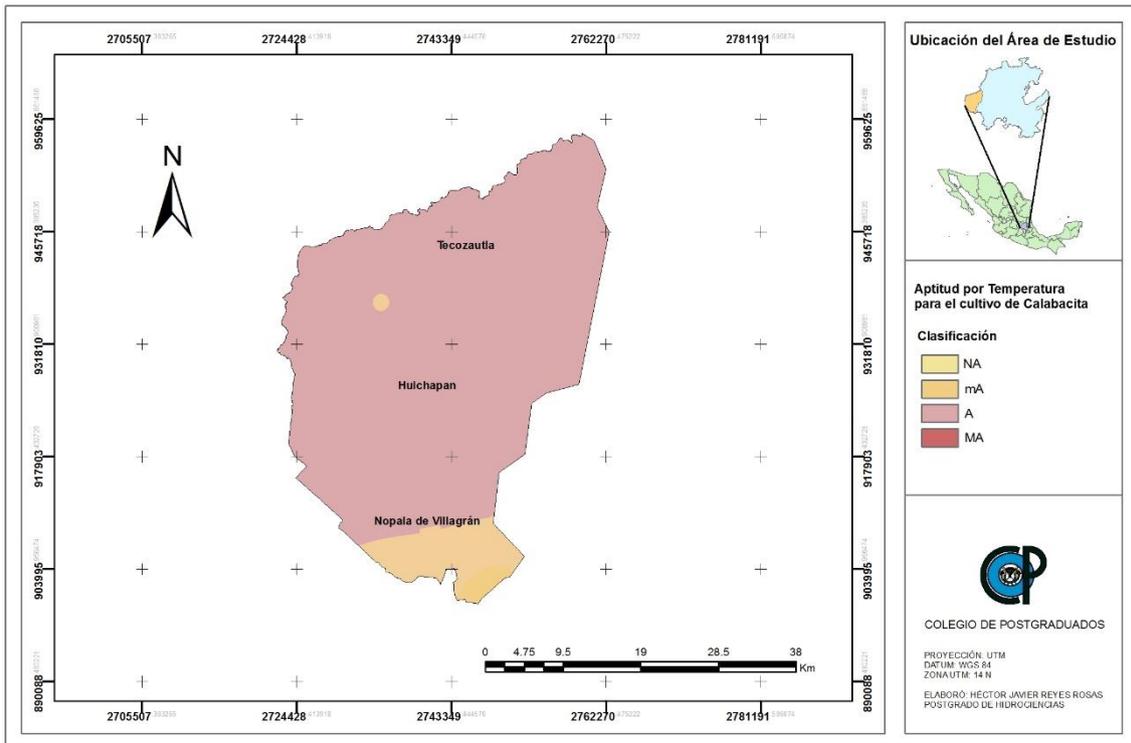


Figura 14. Localización de áreas con aptitud térmica para el cultivo de Calabacita.

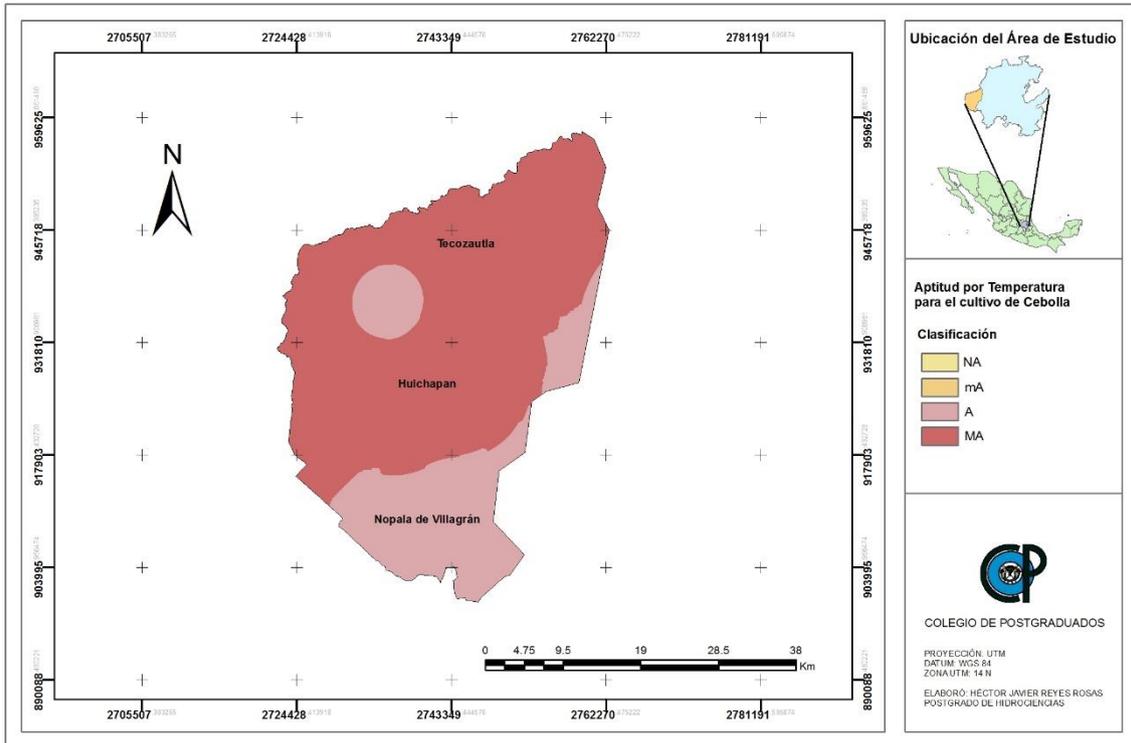


Figura 15. Localización de áreas con aptitud térmica del cultivo de Cebolla.

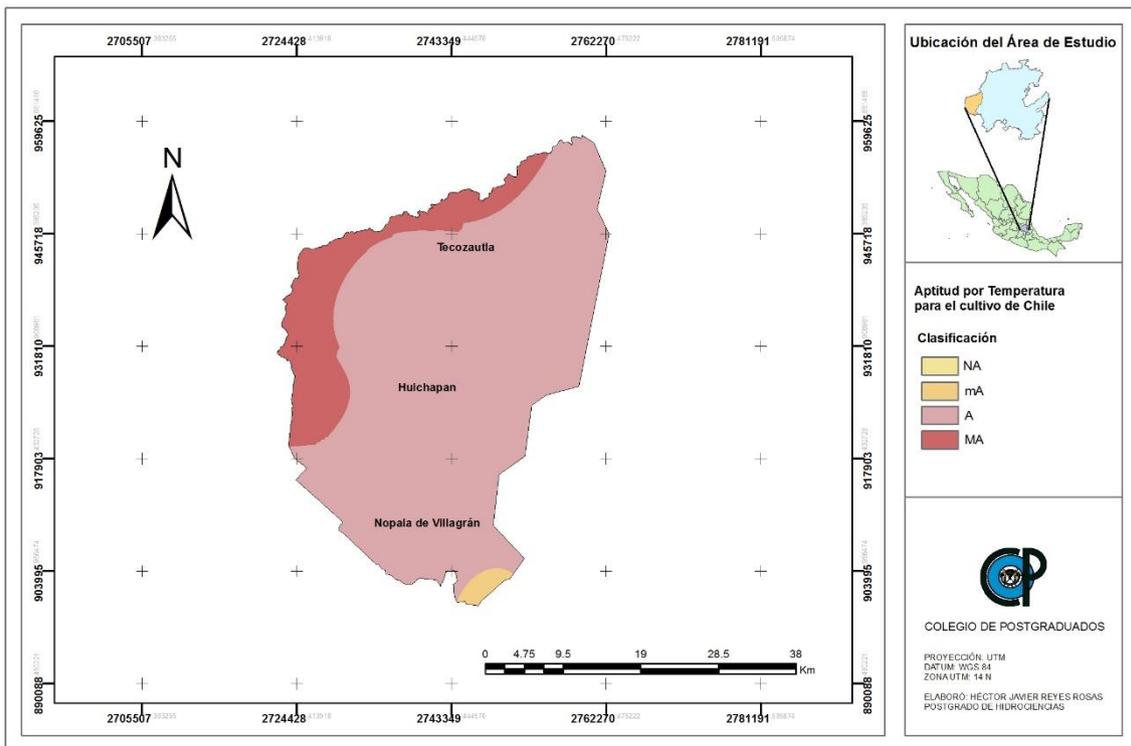


Figura 16. Localización de áreas con aptitud térmica para el cultivo de Chile.

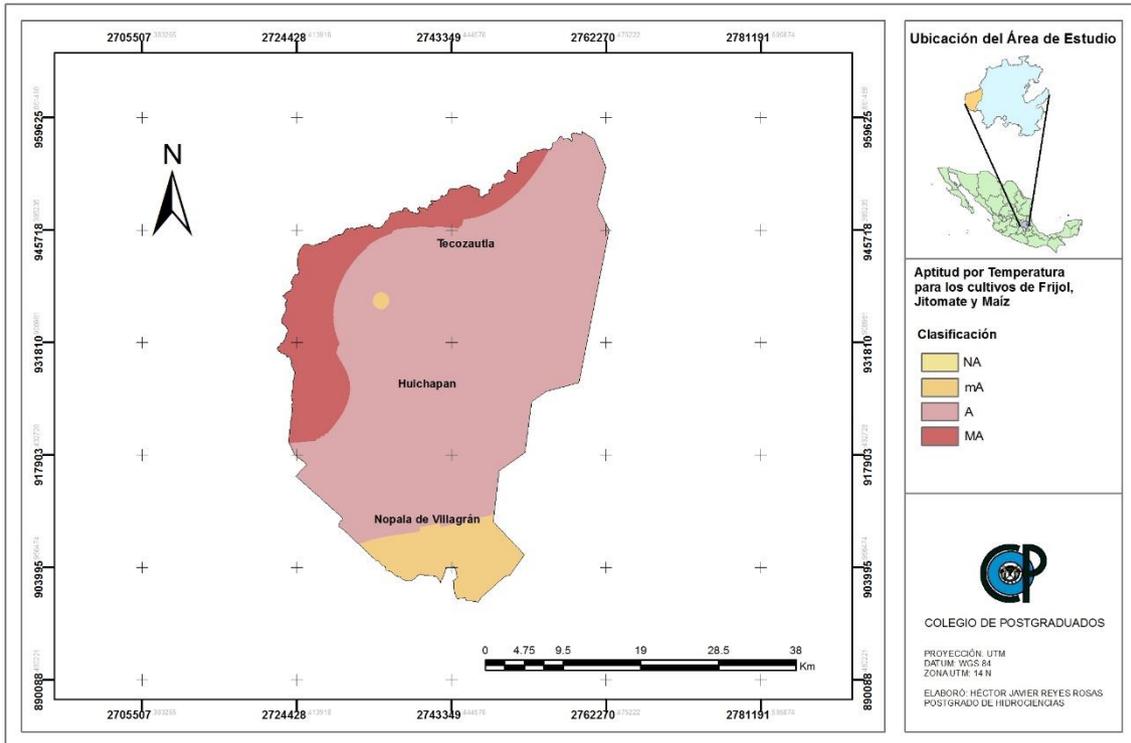


Figura 17. Localización de áreas con aptitud térmica para los cultivos de Frijol, Jitomate y Maíz.

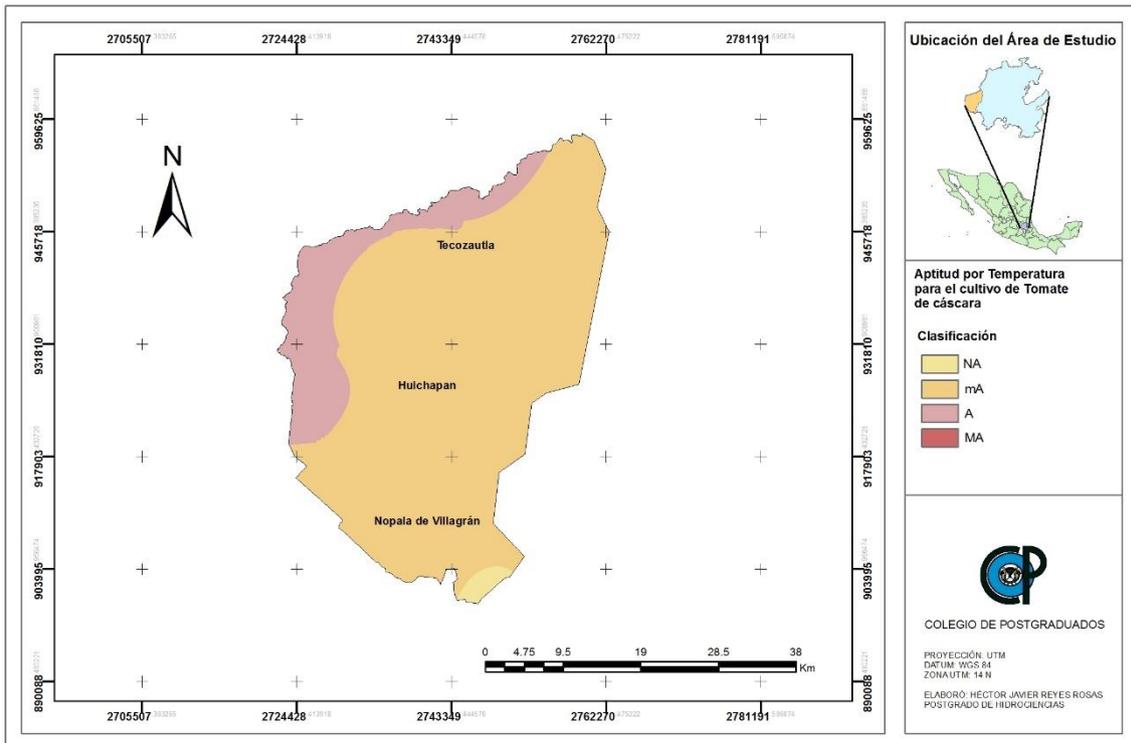


Figura 18. Localización de áreas con aptitud térmica para el cultivo de Tomate de cáscara.

5.2. Estimación del Periodo Libre de Heladas

Después haber introducido los datos señalados anteriormente en la metodología en el apartado de cálculo de heladas, el programa estima las probabilidades de que ocurra una temperatura mínima por debajo de la temperatura crítica en una fecha más tardía en primavera o más temprana en otoño con respecto a la fecha que se presenta en el gráfico siguiente en la Figura 19 y la probabilidad de que haya una helada en 5 años con un riesgo del 20%.



Figura 19. Probabilidad de tener una temperatura mínima más baja que la temperatura crítica en una fecha más tardía en primavera o más temprana (estación met. Huichapan).

De acuerdo a la Figura 18 se logró estimar del periodo libre de heladas con un riesgo de 20%, lo que significa que 8 de cada 10 años no se presentaron heladas. Para el caso de la figura anterior la estación meteorológica que se muestra fue Huichapan, en la cual se observa que tiene un periodo libre de heladas de 219 días, los cuales oscilan entre el 7 de marzo al 12 de octubre.

De esta forma se hizo para las estaciones restantes, presentándose los periodos libre de heladas en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Estaciones meteorológicas con estimaciones de periodos libres de heladas

Clave de Estación	Nombre de la Estación Meteorológica	Entidad	Periodo Libre de Heladas	Días Libres de Heladas al 20% de probabilidad
13012	Huichapan	Hidalgo	07-mar a 12-oct	219
13064	Chapantongo	Hidalgo	19-mar a 28-oct	223
13081	Presa Golondrinas	Hidalgo	25-mar a 04-nov	224
13083	Presa Madero	Hidalgo	30-mar a 27-oct	211
13088	Tasquillo	Hidalgo	01-feb a 14-dic	316
13090	Rio Salado	Hidalgo	16-mar a 05-oct	203
13097	Chilcuautla	Hidalgo	26-mar a 17-oct	205
13125	Alfajayucan (dge)	Hidalgo	19-mar a 10-nov	236
13152	El potrero	Hidalgo	23-abr a 06-sep	136
13156	Tlaxcalilla	Hidalgo	10-abr a 18-oct	191
15002	Aculco (smn)	México	19-mar a 04-oct	199
15064	Oxthoc	México	29-mar a 23-oct	208
15185	Presa el Molino	México	03-abr a 06-oct	186
15187	Presa Huapango	México	10-may a 27-sep	140
15189	La Concepción	México	05-may a 13-oct	161
15190	Presa San Ildefonso	México	15-mar a 27-oct	226
15260	San Lucas Totolmaloya	México	21-mar a 31-oct	224
22022	San Juan del Rio (dge)	Querétaro	14-mar a 10-nov	241
22025	Presa Centenario	Querétaro	06-mar a 12-nov	251
22031	Presa paso de tablas	Querétaro	10-mar a 04-nov	239
22033	San pablo	Querétaro	27-mar a 29-oct	216
22042	La Llave	Querétaro	05-mar a 11-nov	251
22054	El Salitre	Querétaro	02-feb a 29-nov	300

Dichas estimaciones de Periodos Libres de Heladas se utilizaron para realizar la representación espacial de estos como se observa a continuación en la Figura 20. En la cual se puede observar que zonas son las que cuentan con menor y mayor días libres de heladas, las cuales servirán para saber que cultivos son aptos o se pueden desarrollar de acuerdo a la duración de su ciclo vegetativo de determinada especie.

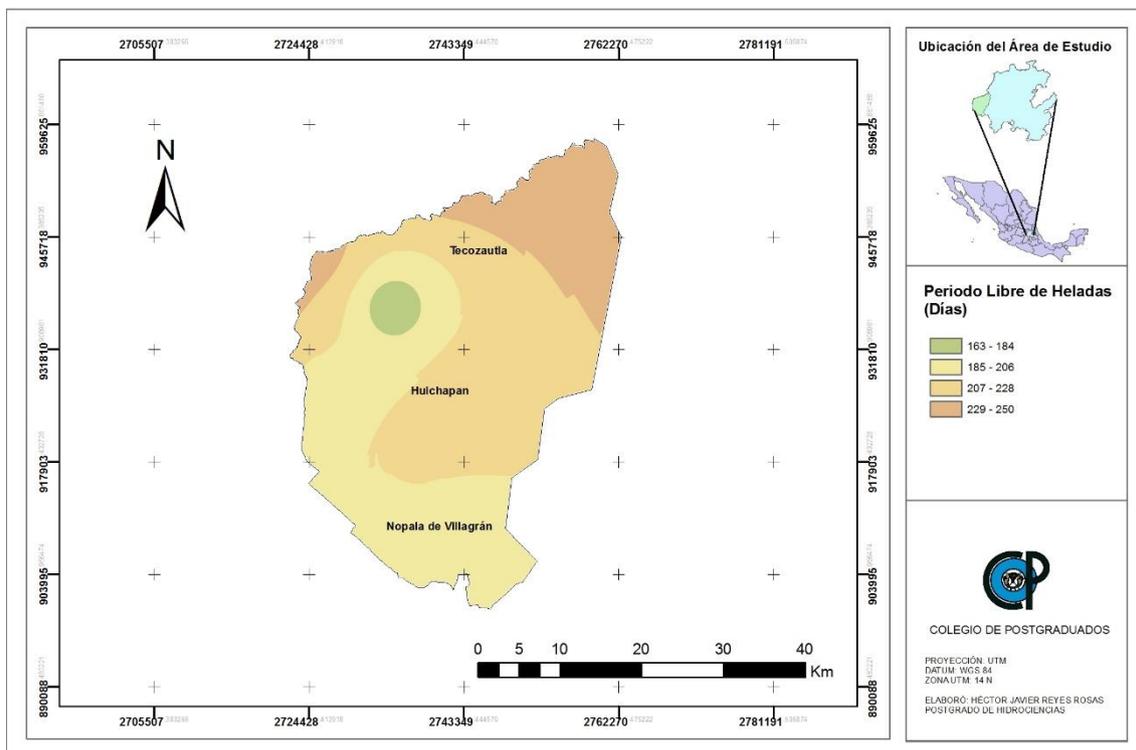


Figura 20. Representación espacial de los periodos libres de heladas en la zona de estudio.

De acuerdo a la Figura 20 y al Cuadro 6 se puede observar que en la mayoría de la zona de estudio supera los seis meses libres de heladas, con un riesgo de 20%, lo que significa que 8 de cada 10 años no se presentaron heladas en ese periodo, y de acuerdo a la duración del ciclo de los cultivos de estudio como el Ajo, calabacita, chile, elote, frijol, jitomate maíz, pepino y tomate de cascara les permitiría desarrollarse sin tener el riesgo de presentarse una helada en ese periodo, el cultivo que requiere más días para cumplir su ciclo es la cebolla, pero de acuerdo a los especificaciones de este cultivo, es tolerante a las heladas en comparación con los otros cultivos.

Además de lo dicho anteriormente no todos los ciclos de los cultivos de interés se encuentran dentro de los periodos libres de heladas, por lo tanto existen métodos

directos para minimizar la pérdida de calor del suelo, tales como aplicación de riego, aspersión de agua, protección de cubiertas sobre la vegetación, entre otros.

5.3. Estimación Grados Días de Desarrollo (GDD)

Para el cálculo de los Grados Días de Desarrollo, se utilizaron las temperaturas base o umbrales (temperatura mínima y máxima) de cada cultivo, junto con las temperaturas mínimas y máximas diarias por un periodo de dos años por cada estación meteorológica, además una fecha aproximada de siembra y cosecha (Cuadro 7).

Cuadro 7. Fechas de siembra y cosecha para cada cultivo y periodo de crecimiento.

Cultivos	Temperaturas Base °C (mín-máx)	Fecha de Siembra	Día Juliano Siembra	Fecha de Cosecha	Día Juliano Cosecha	Ciclo del cultivo (días aprox.)
Ajo	6-35	01-ago	213	05-ene	370	157
Calabacita	7-30	10-ene	10	24-mar	83	73
Cebolla	5-35	01-oct	274	01-may	486	212
Chile	7-29	10-ene	10	10-may	130	120
Elote	10-30	01-jun	152	25-sep	309	116
Frijol	10-30	01-may	121	20-ago	232	111
Jitomate	10-35	01-feb	32	15-jun	166	134
Maíz	10-30	01-jun	152	05-nov	309	157
Pepino	10-35	05-ene	5	01-abr	91	86
Tomate De Cascara	12-32	15-feb	46	20-may	140	94

Fuente: Ciclo de los cultivos SARH (1982)

Nota: Para el caso de los cultivos de ajo y cebolla, su periodo de crecimiento terminan en el segundo año después de su fecha de siembra, por tal motivo el día juliano aparece de forma consecutiva (370 para ajo y 486 para cebolla, que corresponden al 5 de enero y al 1 de mayo respectivamente). Cabe mencionar que estas fechas de siembra y cosecha son aproximadas y puede variar según sea el caso para cada productor.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de los GDD para el cultivo del Ajo, tomando en cuenta que la fecha de siembra fue el día juliano 213 y la cosecha el día 370.

Temperaturas umbrales del ajo:

$$T_{c-min} = 6^{\circ} C \quad \text{y} \quad T_{c-max} = 35^{\circ} C$$

Para el siguiente caso se utilizó de la ecuación (1):

$$\text{Si } \bar{T}_i < T_{c-max}: \quad {}^{\circ}D_i = \bar{T}_i - T_{c-min}$$

Temperatura promedio del día de los días julianos:

$$\bar{T}_{i=213} = 10^{\circ} C$$

$$\bar{T}_{i=370} = 17^{\circ} C$$

Ejemplo de cálculo de los grados días de desarrollo

$${}^{\circ}D_{i=213} = 10 - 6 = 4^{\circ} D$$

$${}^{\circ}D_{i=370} = 17 - 6 = 11^{\circ} D$$

Total de grados días de desarrollo acumulados de la fecha de siembra a la cosecha.

$${}^{\circ}D_{i=370-213} = 1361.1^{\circ} D$$

Del día juliano 213 al 370 hay una diferencia de 157 días, los cuales representan el periodo vegetativo del ajo en días, para lo cual los grados días de desarrollo acumulados son un total de 1361.1, como se puede observar a continuación en el

Cuadro 8. Además también se presentan los GDD acumulados para los cultivos restantes y por cada estación meteorológica.

Cuadro 8. Grados días de desarrollo acumulados para cada estación meteorológica por ciclo del cultivo

ID_EST	AJO	CALABACITA	CEBOLLA	CHILE	ELOTE	FRIJOL	JITOMATE	MAIZ	PEPINO	TOMATE_C
013012	1361.1	556.3	1988.0	1090.6	838.7	881.7	1039.7	1035.5	503.7	593.3
013064	1174.6	255.5	1492.4	586.9	810.0	533.2	533.2	970.4	142.0	231.0
013076	1195.7	366.0	1371.5	764.6	697.0	644.1	668.6	871.5	298.2	355.5
013081	1431.0	518.0	2032.2	1051.7	980.4	967.7	1025.6	1188.9	477.7	605.2
013083	1402.8	550.1	1993.6	1074.3	884.3	872.3	988.4	1087.9	480.9	545.7
013088	1684.1	638.9	2516.1	1118.4	914.8	882.5	955.1	1199.2	558.7	544.1
013090	1573.0	848.6	2326.5	1466.9	925.9	894.4	1159.5	1179.8	709.4	669.9
013097	1414.0	595.9	2324.6	1061.9	711.8	790.1	865.3	938.9	516.9	497.9
013125	1801.9	719.4	2559.3	1407.6	1273.4	1307.0	1378.5	1587.8	626.0	782.8
013152	1335.1	544.2	2096.7	1026.2	827.4	847.9	975.4	1044.0	511.1	591.0
013156	1287.3	568.3	1820.5	1077.4	817.3	844.0	998.8	1031.8	531.6	609.7
015187	889.1	343.1	1380.7	653.7	455.6	450.3	549.6	547.9	266.9	283.7
015189	1320.1	423.3	1728.7	870.4	905.1	942.9	919.6	1031.8	381.4	530.5
015260	1287.5	447.3	1832.0	791.6	681.1	634.0	680.0	880.2	360.6	350.6
022022	1866.2	728.8	2596.6	1386.9	1275.2	1258.6	1326.5	1579.8	608.6	754.6
022025	1845.5	597.2	2463.7	1326.3	1399.7	1601.7	1572.3	1811.2	536.7	882.6
022031	1611.3	591.7	2369.7	1245.0	1023.4	1072.9	1226.8	1300.5	548.5	727.3
022033	1221.9	478.6	1822.9	911.3	644.4	648.1	778.3	788.0	390.7	436.1
022042	1763.5	170.4	2290.8	1285.2	1252.1	1270.2	1312.3	1578.0	559.0	754.1
022054	1566.2	952.0	2779.4	1330.7	820.6	818.6	1004.9	1082.7	857.6	599.6

Con base en los datos registrados en las diferentes estaciones localizadas en la zona de estudio (Cuadro 8) y considerando la acumulación de GDD para los diferentes cultivos estudiados en este trabajo de investigación se presenta en las Figuras 21 a la 30 la distribución espacial de los GDD para los diferentes cultivos de interés si se sembraran en la fecha que se indica en el Cuadro 7.

Para el caso de la Figura 21 que corresponde al ajo, Se aprecia que acumula una cantidad de GDD que va desde los 1214.9 a los 1540.5°D. En la Figura 22 correspondiente a la calabacita, se observa que la acumulación oscila entre los 431.2 y 695.1°D. De acuerdo a la Figura 23 que corresponde al cultivo de la cebolla, la zona se encuentra mayoritariamente entre 1840.9 y 2310°D. Para el cultivo del chile representado por la Figura 24 el rango en el que oscila esta entre los 880.4 a los 1173.6°D. Para el cultivo del elote en la Figura 25 van principalmente desde los 770.3 a los 927.5°D. Para el caso del cultivo del frijol en la Figura 26 la acumulación de los GDD se encuentra en la mayoría del territorio en un rango que van desde los 642.2 a los 1025.6°D. Los GDD acumulados para el cultivo del jitomate que se encuentra en la Figura 27 varían entre los 879.5 a los 1225.7°D. Mientras tanto para el cultivo del maíz en la Figura 28 los GDD oscilan principalmente entre los 969 a los 1179.3°D. Posteriormente para el cultivo del pepino en la Figura 29 se muestra la acumulación de GDD que se encuentran entre los 379.8 a los 617.2°D. Por último en la Figura 30 se encuentra el cultivo del tomate de cascara el cual presenta una acumulación de GDD que varían entre los 448.3 a los 665.3°D.

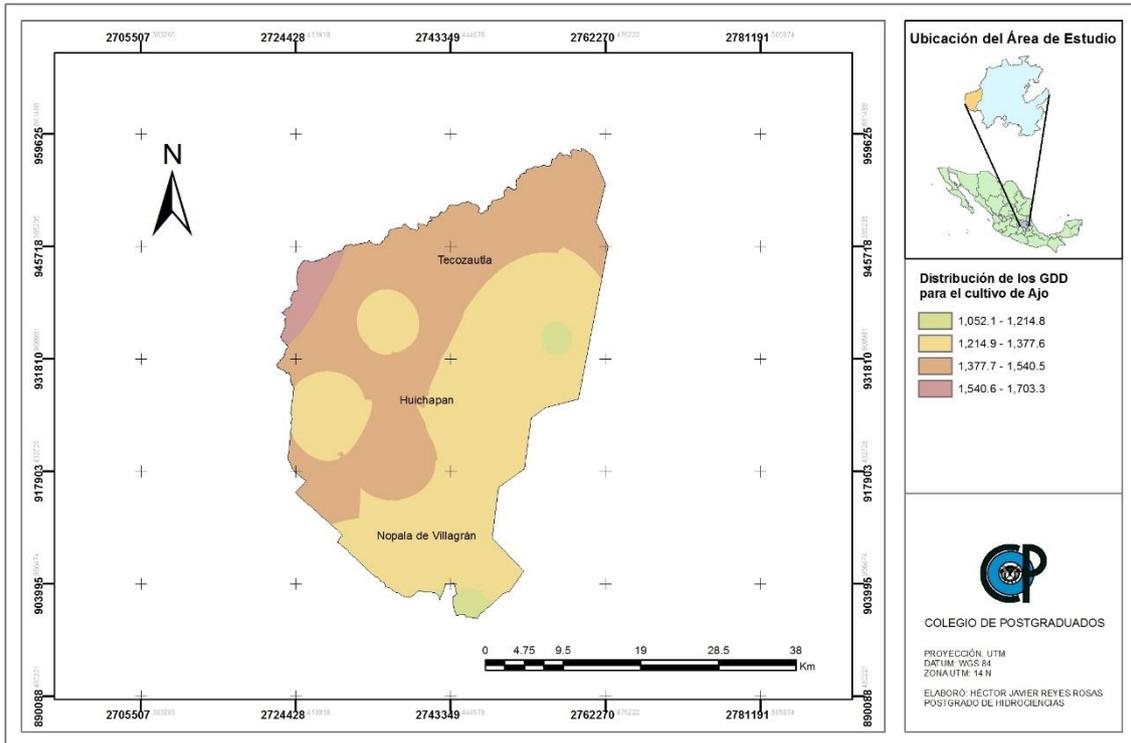


Figura 21. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Ajo.

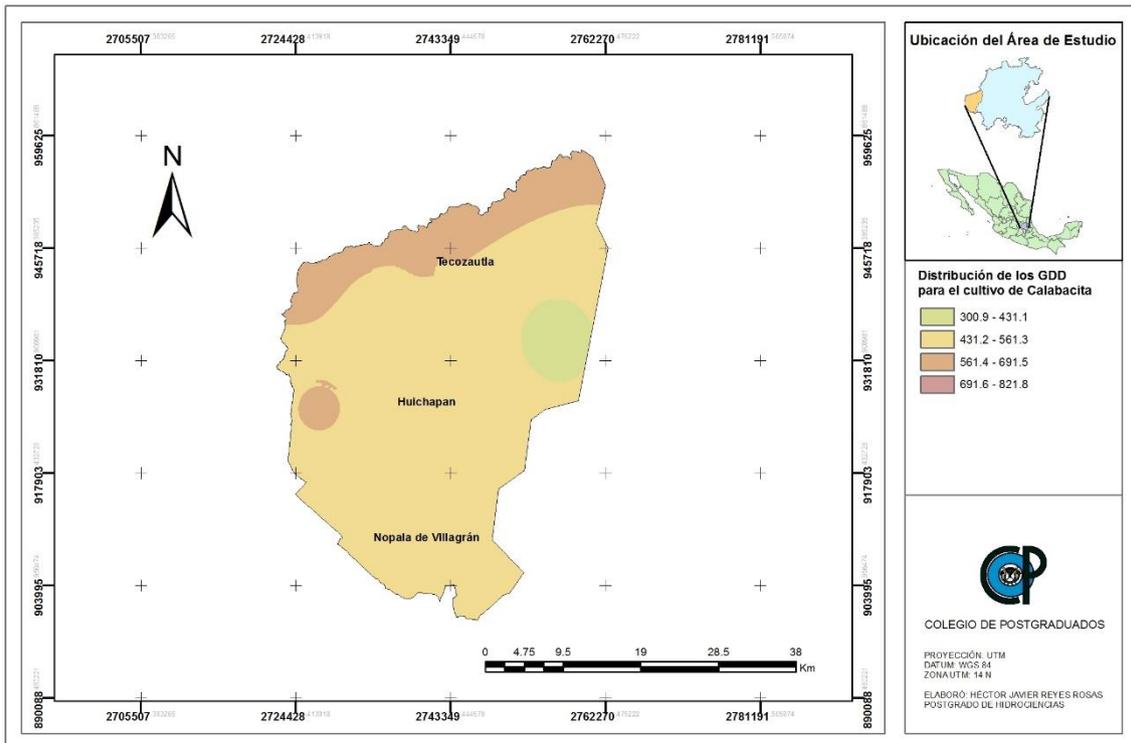


Figura 22. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Calabacita.

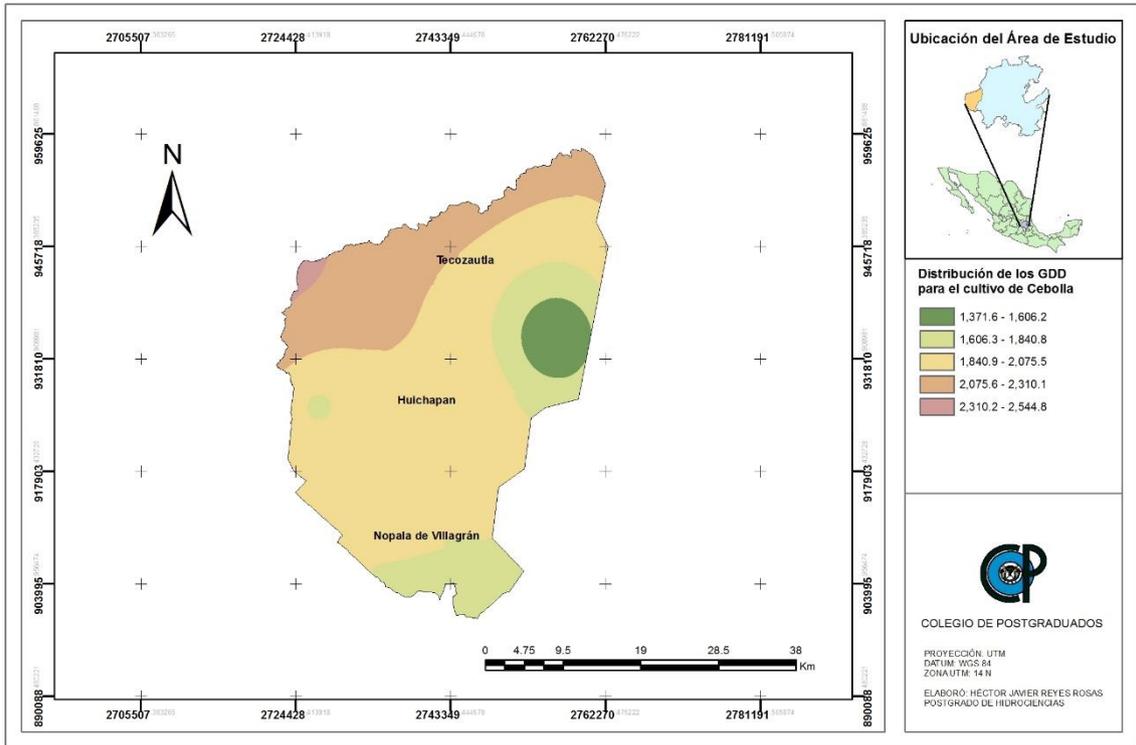


Figura 23. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Cebolla.

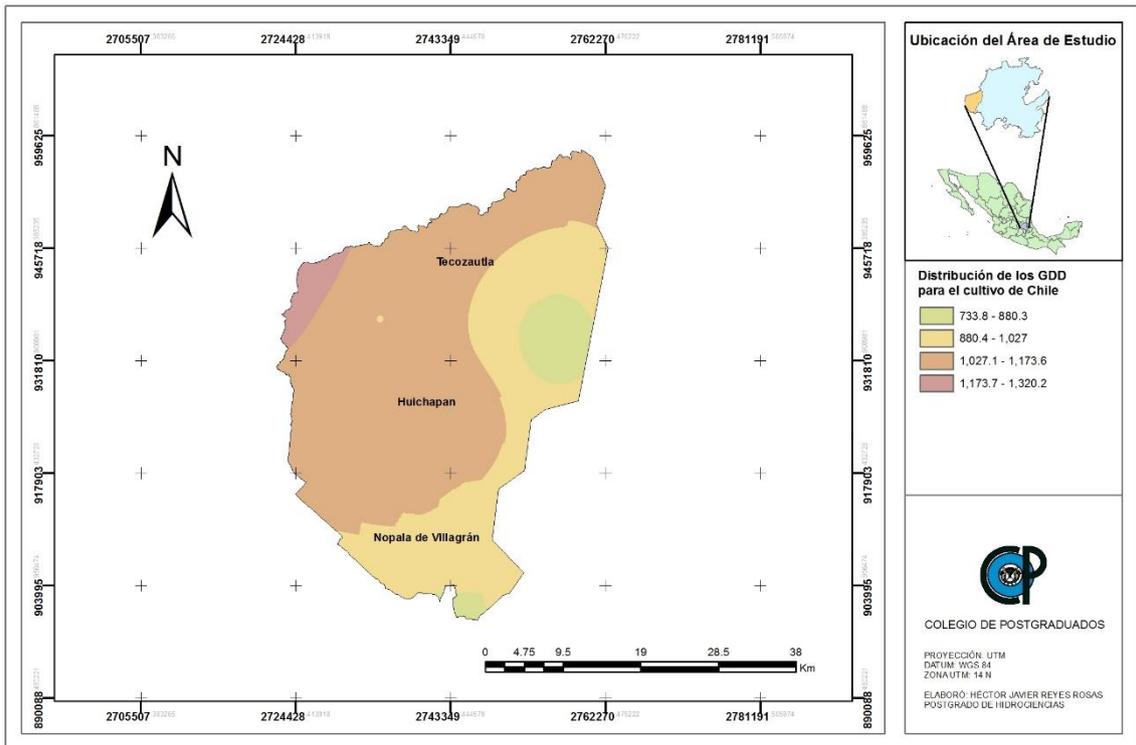


Figura 24. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Chile.

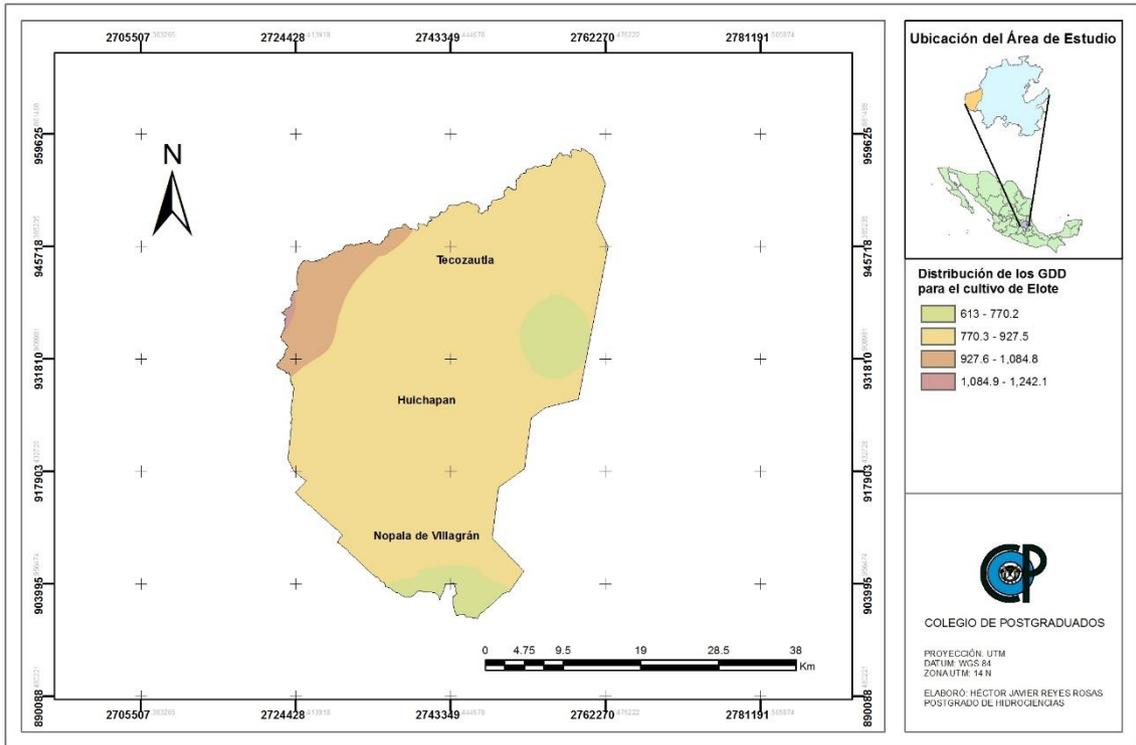


Figura 25. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Elote.

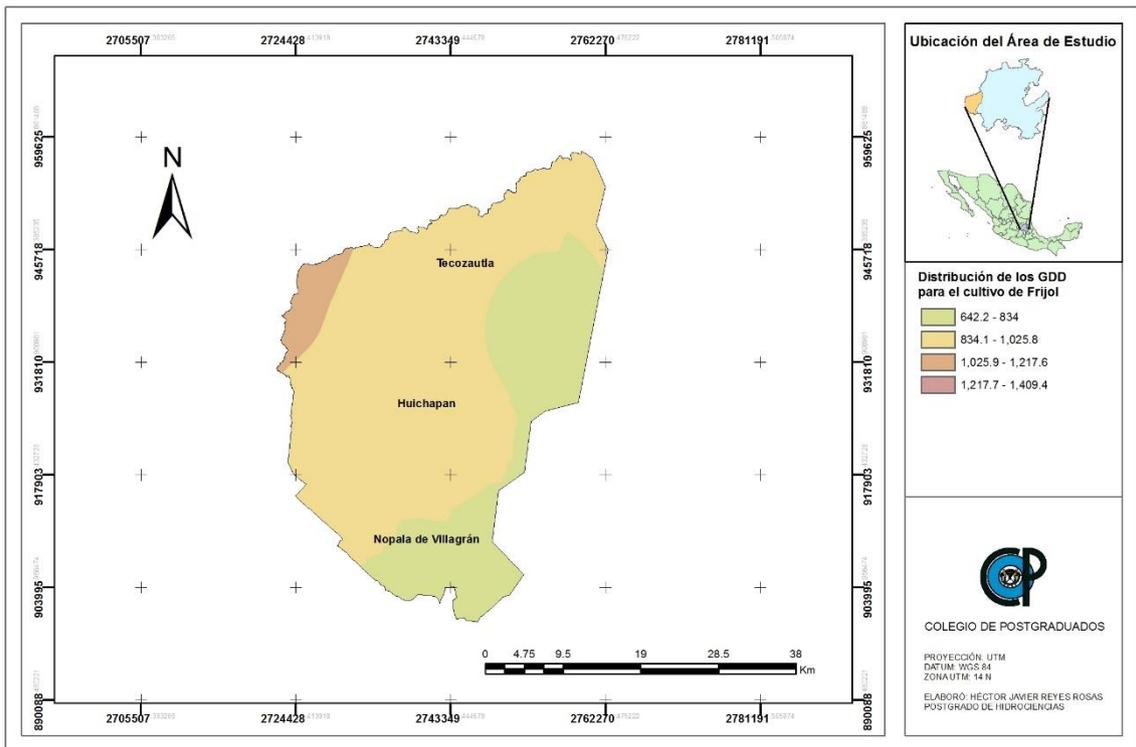


Figura 26. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Frijol.

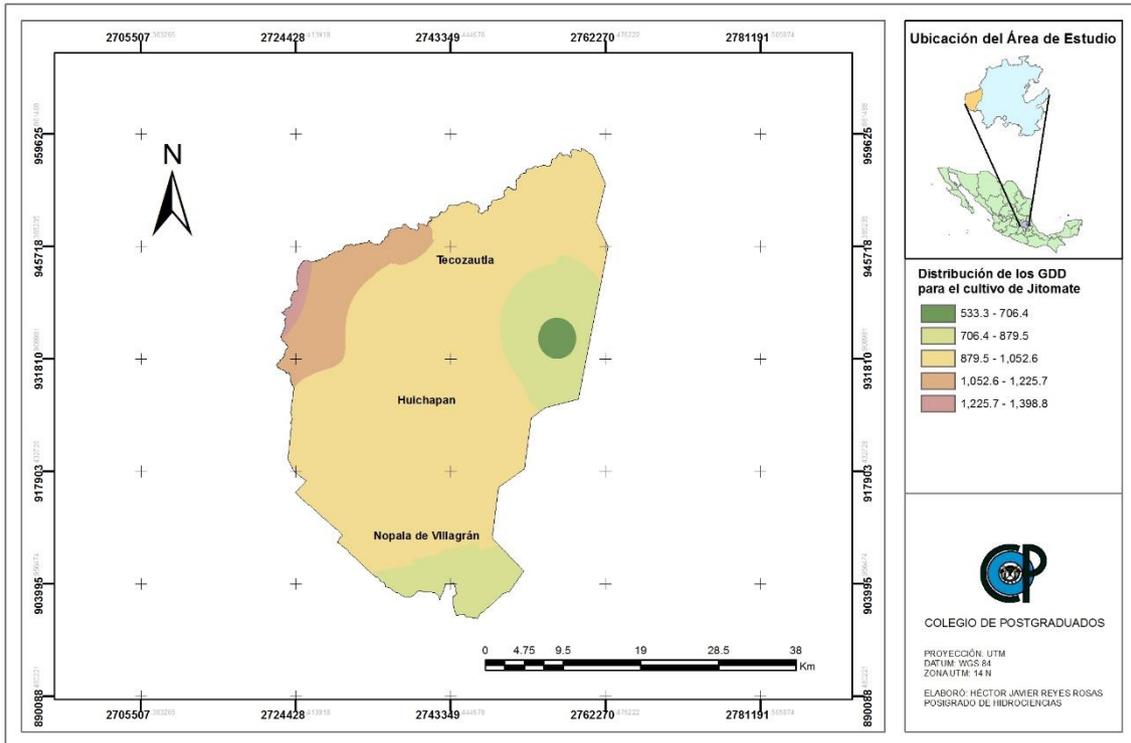


Figura 27. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Jitomate.

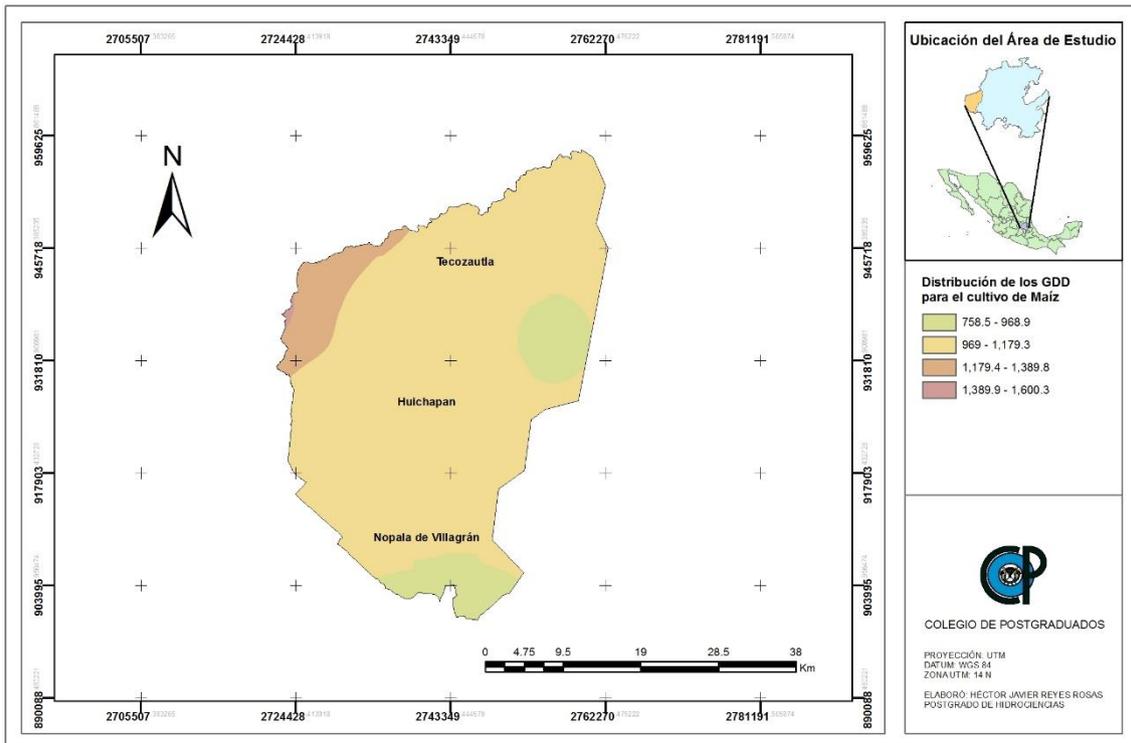


Figura 28. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Maíz.

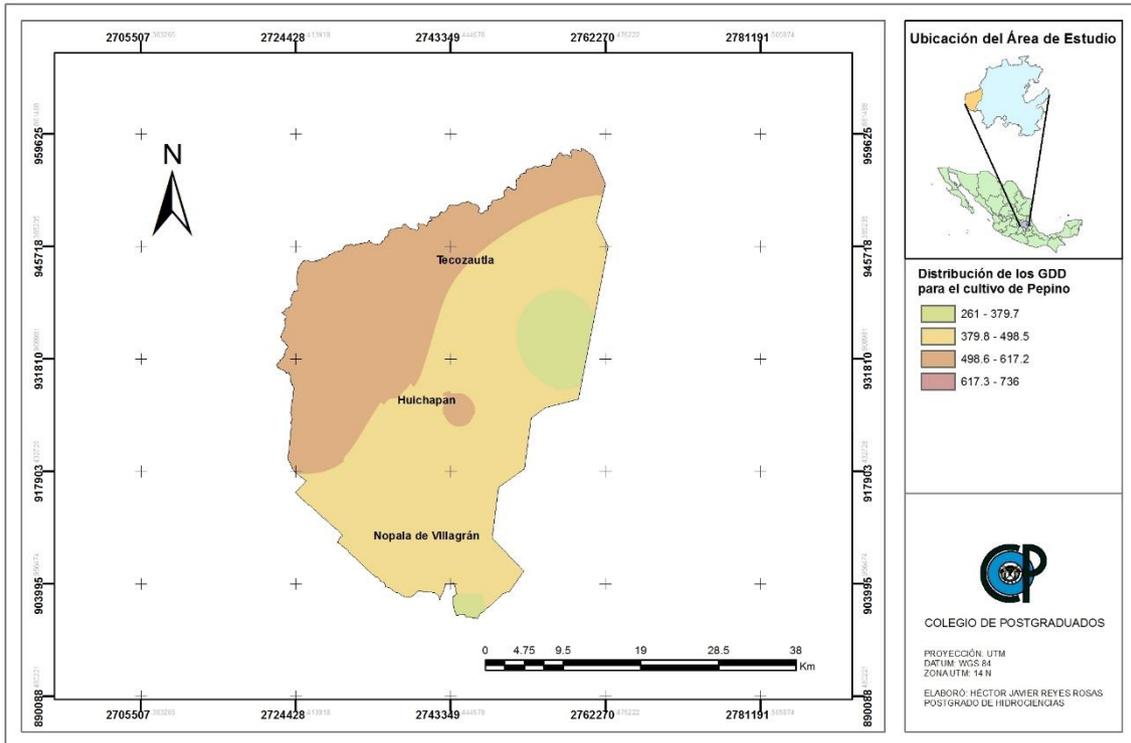


Figura 29. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Pepino.

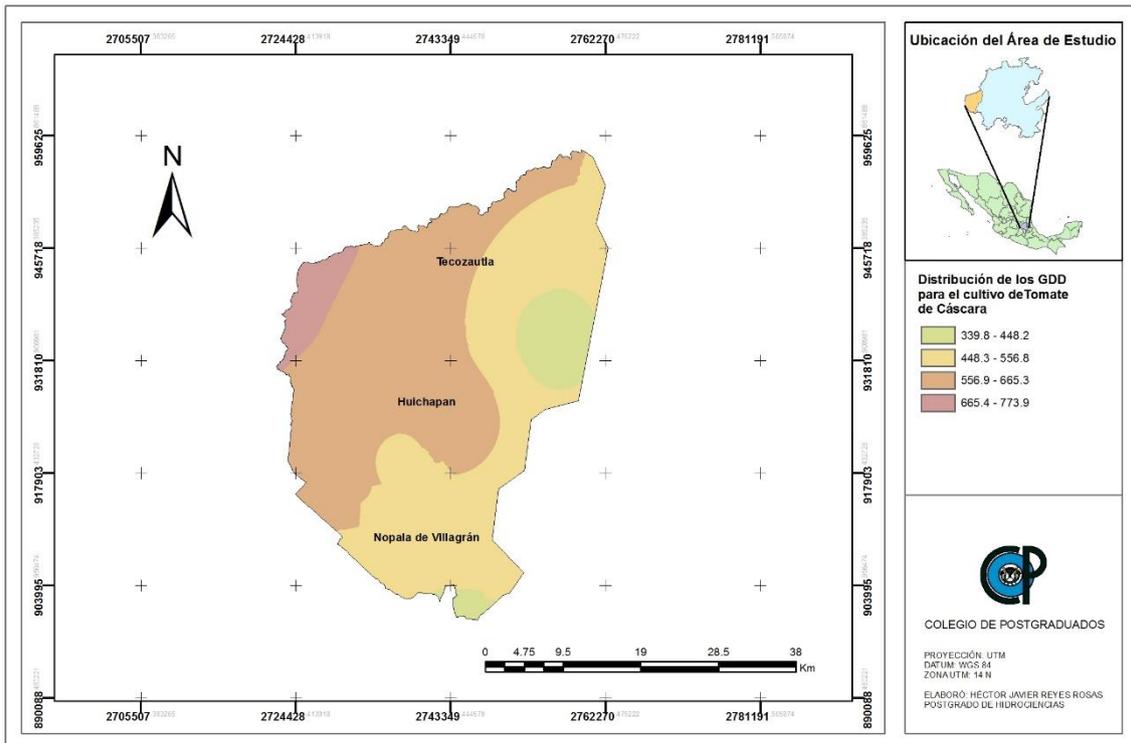


Figura 30. Distribución espacial de los GDD en la zona de interés para el cultivo de Tomate de cáscara.

Para la mayoría de los mapas presentados en las Figura 21 a la 30, la mayor acumulación de GDD se encuentra en la región norte de la zona de estudio, en esta zona las temperaturas son más altas en comparación con las de la parte sur, ya que en la parte sur se presentan temperaturas más bajas, mayor altura, además de que se presenta un clima del tipo C (w1) que corresponde a un clima templado.

Ojeda *et al*, (2006) menciona que para el caso del maíz la acumulación de °D para la madurez fisiológica es de 1451 °D, aunque la maduración de variedades de maíz varía de 1150 a 1760 para valores acumulados de °D (Neild y Newman, 1987), por lo cual al observar la Figura 28, se puede apreciar que solo una pequeña parte en comparación con la demás área es Apta para su buen desarrollo, y que la demás sería marginalmente Apta y que su ciclo de dicho cultivo tardaría más en cumplirse de acuerdo al calendario de siembra, es por eso la importancia de medir la cantidad de calor acumulado en el tiempo, ya que provee una escala de tiempo fisiológico que es biológicamente más precisa que los días calendario.

5.4. Zonificación por Precipitación

Para el caso de la precipitación la clasificación se obtuvo de la misma manera a la clasificación de la precipitación. Para el caso del cultivo del ajo, se inició a partir de la precipitación óptima que se encuentran entre los 750-1600 mm y de la precipitación mínima y máxima con un rango de 500-2700 mm, para la clasificación de Muy Apta se tomó la precipitación óptima, para el caso de la clasificación Apta y marginalmente Apta se obtuvo a partir de dividir el rango entre la precipitación mínima (500 mm) y la

óptima mínima (750 mm) dando como resultado el parámetro de 625 mm. De la misma forma se hizo para la precipitación máxima (2700 mm) y la óptima máxima (1600 mm) de la cual se obtuvo 2150 mm, como se puede observar en la Figura 31.

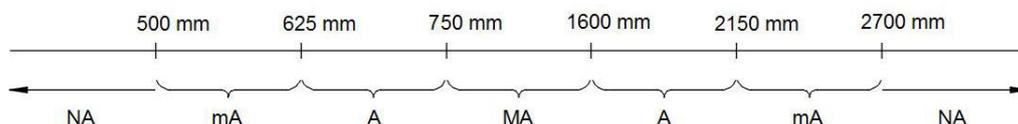


Figura 31. Clasificación de temperaturas para el cultivo del ajo

Para los demás cultivos se realizó la misma metodología para obtener sus clasificaciones por precipitación, como se muestra a continuación en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Clasificación de zonas aptas de acuerdo a su requerimiento de precipitación de los cultivos de interés en mm.

Cultivos	MA	A	mA	NA
Ajo	750-1600	>625 - <750 y >1600 - <2150	>500 - <625 y >2150 - <2700	<500-2700>
Calabacita	600-1500	>450 - <600 y >1500 - <2150	>300 - <450 y >2150 - <2800	<300-2800>
Cebolla	350-600	>325 - <350 y >600 - <1700	>300 - <325 y >1700 - <2800	<300-2800>
Chile	600-1500	>500 - <600 y >1500 - <1750	>400 - <500 y >1750 - <2000	<400-2000>
Elote y Maíz	600-1200	>500 - <600 y >1200 - <1500	>400 - <500 y >1500 - <1800	<400-1800>
Frijol	500-2000	>400 - <500 y >2000 - <3150	>300 - <400 y >3150 - <4300	<300-4300>
Jitomate	600-1300	>500 - <600 y >1300 - <1550	>400 - <500 y >1550 - <1800	<400-1800>
Pepino	1000-1200	>700 - <1000 y >1200 - <2750	>400 - <700 y >2750 - <4300	<400-4300>
Tomate De Cascara	700-1000	>650 - <700 y >1000 - <1050	>600 - <650 y >1050 - <1100	<600-1100>

A continuación, en las Figuras 32 a la 38, se presentan los mapas obtenidos a partir de las precipitaciones promedio de cada estación, en la cual se muestra la distribución espacial de ésta y como es que cada cultivo se ubica de acuerdo a su requerimiento de agua.

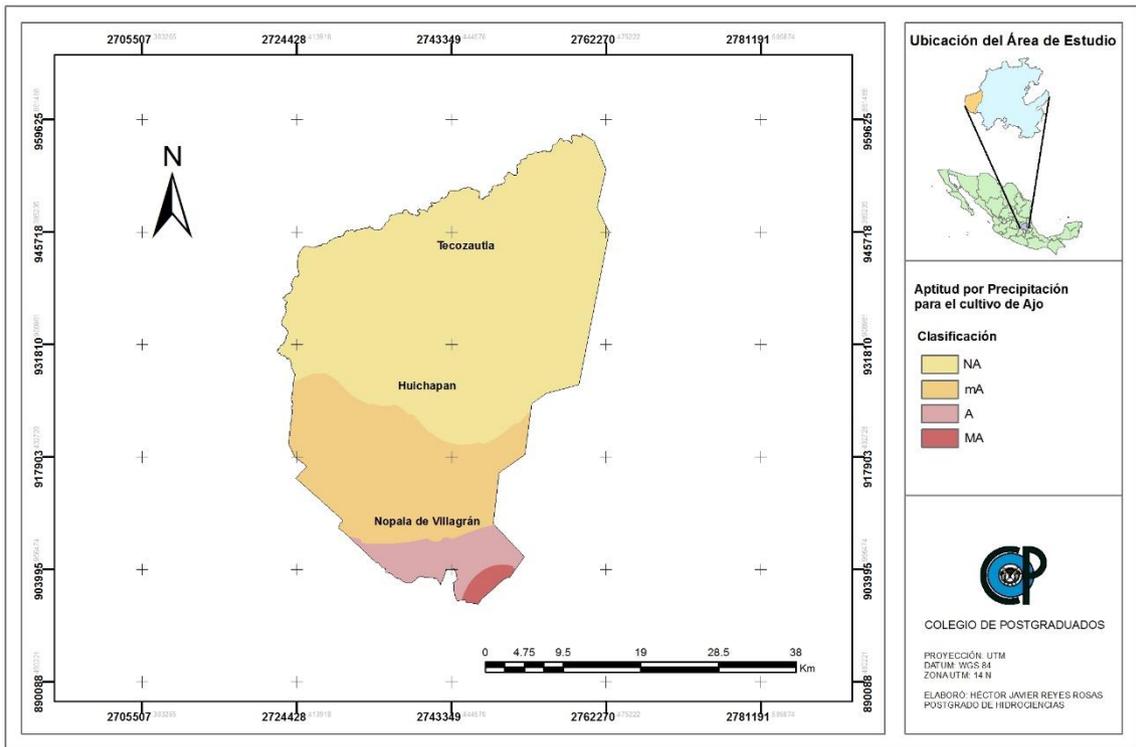


Figura 32. Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Ajo.

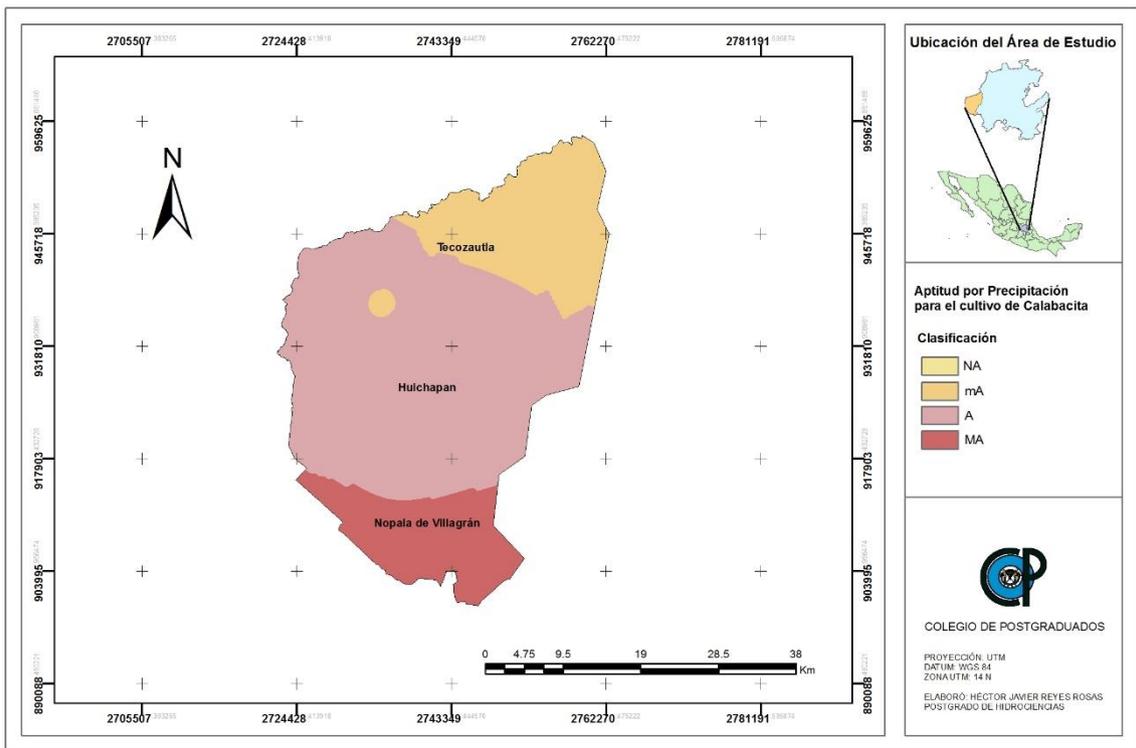


Figura 33. Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Calabacita.

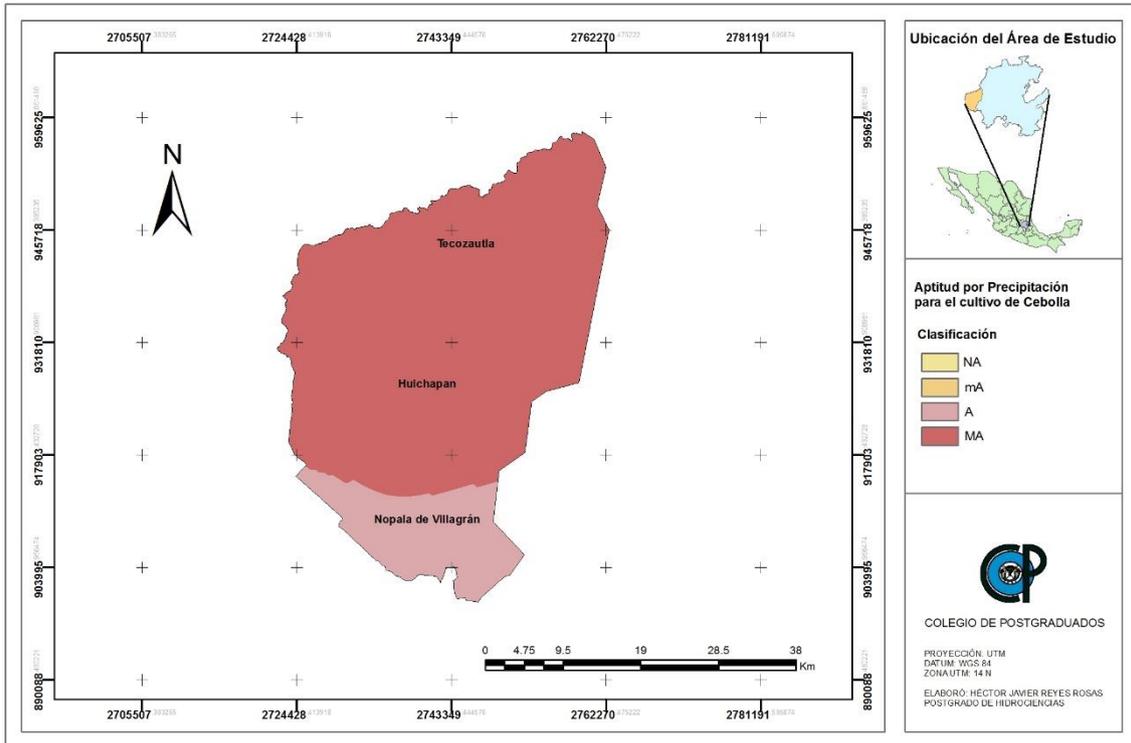


Figura 34. Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Cebolla.

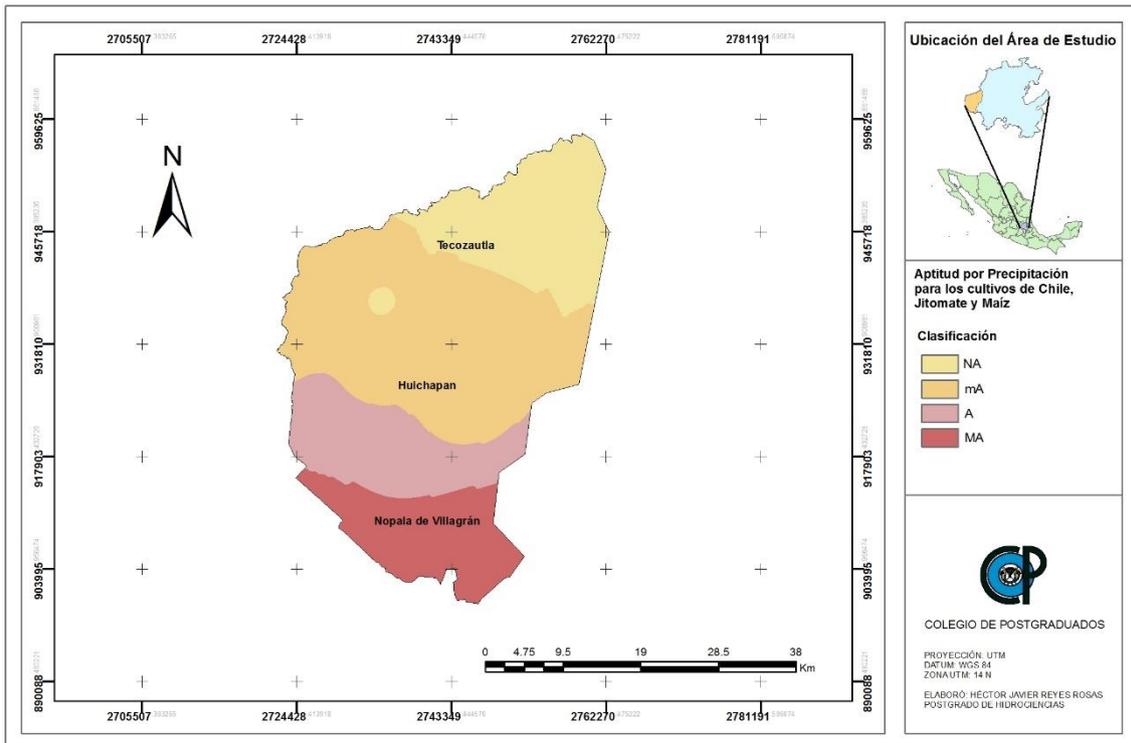


Figura 35. Localización de áreas con aptitud por precipitación para los cultivos de Chile, Jitomate y Maíz.

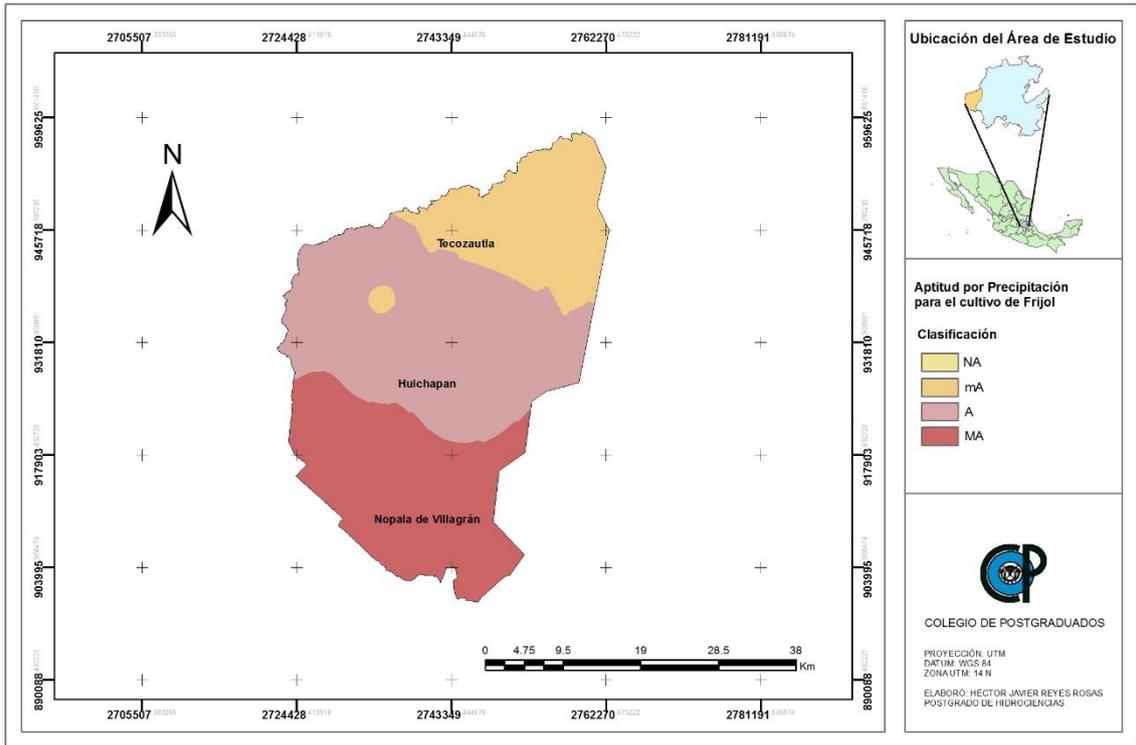


Figura 36. Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Frijol.

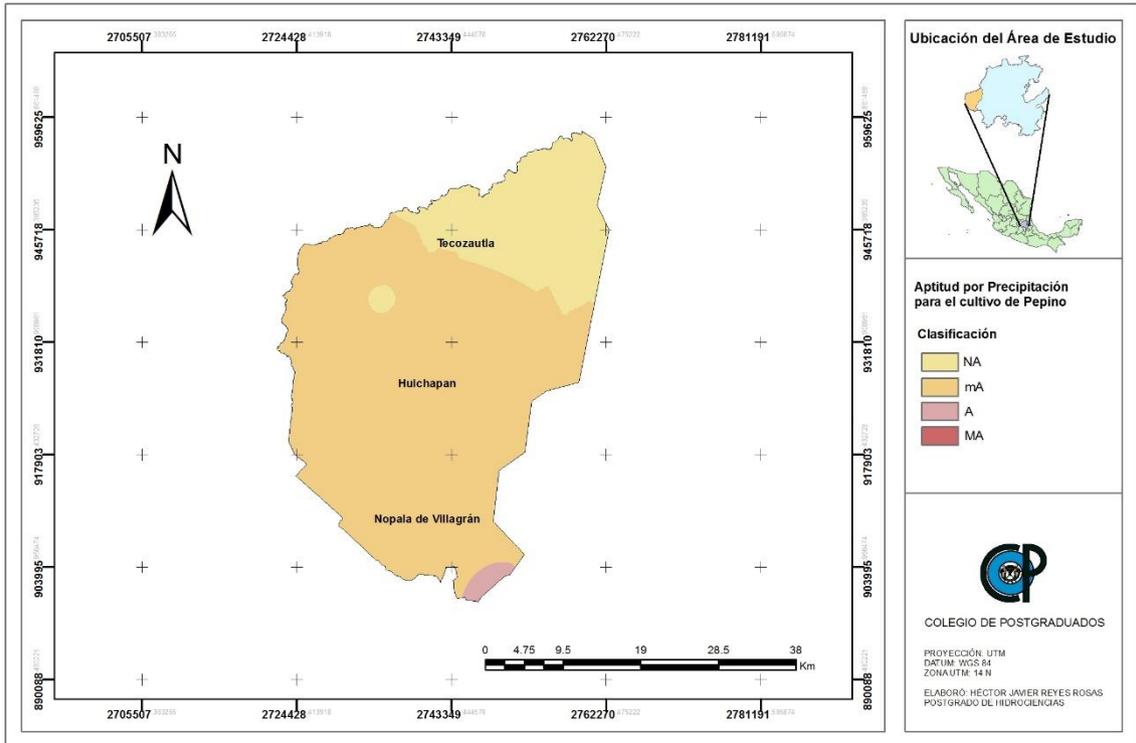


Figura 37. Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Pepino.

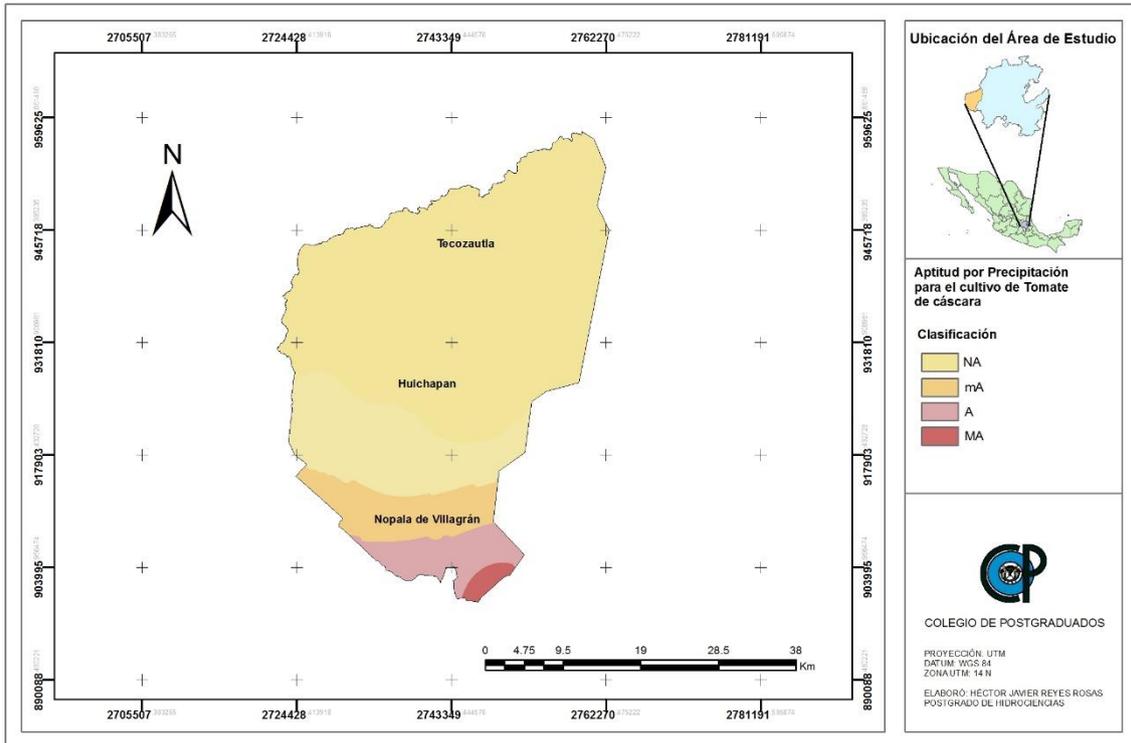


Figura 38. Localización de áreas con aptitud por precipitación para el cultivo de Tomate de cáscara.

Como se puede observar, en varias de las figuras mostradas, se aprecia que existe un déficit de agua para cubrir el requerimiento de cada cultivo, por lo cual es necesario complementar con riegos para que el ciclo del cultivo se desarrolle en cada una de las zonas que se requiera.

5.5. Estimación del Balance Hídrico

La estimación del balance hídrico del suelo, fue realizado con base en los valores promedios de Precipitación mensual, ETP (Cuadro 10) de las estaciones meteorológicas señaladas anteriormente, además se utilizó un valor de Capacidad de Campo (CC) de 18 %, para suelos medios (Francos) de acuerdo a la relación general entre el agua disponible para la planta, capacidad de campo y la clase de textura del suelo (Ortiz y Ortiz, 1990) , estas se agruparon en tres zonas: norte (Tecozautla),

centro (Huichapan) y sur (Nopala) correspondientes al acuífero, ya se alcanza apreciar que en cuanto a temperatura y precipitación que existe diferencia entre estas tres zonas.

Cuadro 10. Estimación de la evapotranspiración

	Zona Norte			Zona Centro			Zona Sur		
	Ev	Kp	ETP	Ev	Kp	ETP	Ev	Kp	ETP
Ene	148.7	0.8	118.0	109.8	0.8	87.8	127.0	0.8	101.6
Feb	153.7	0.8	122.9	116.9	0.8	93.5	144.6	0.8	115.7
Mar	197.7	0.8	158.1	171.8	0.8	137.4	196.3	0.8	157.0
Abr	203.2	0.8	162.5	177.8	0.8	142.2	205.8	0.8	164.6
May	218.2	0.8	174.6	192.6	0.8	154.0	204.9	0.8	163.9
Jun	196.0	0.8	156.8	165.8	0.8	132.6	162.7	0.8	130.1
Jul	191.9	0.8	153.6	159.7	0.8	127.8	147.6	0.8	118.1
Ago	190.2	0.8	152.1	155.6	0.8	124.5	144.4	0.8	115.5
Sep	160.8	0.8	128.6	122.2	0.8	97.8	124.5	0.8	99.6
Oct	147.2	0.8	117.8	110.8	0.8	88.7	114.1	0.8	91.3
Nov	134.1	0.8	107.2	105.6	0.8	84.5	110.6	0.8	88.5
Dic	135.5	0.8	108.4	100.1	0.8	80.1	118.7	0.8	94.9

Para el cálculo del balance hídrico se auxilió del programa InnerSoft ISBH Balance Hídrico v0.3 Demo utilizado por Campos *et al.* (2008), el cual proporcionará los parámetros del balance hídrico como se muestra a continuación en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Balance hídrico zona norte.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	4.15	5.41	3.18	10.31	22.37	60.57	96.67	82.52	70.75	36.08	9.25	1.05
ETP	118.00	122.93	158.13	162.54	174.56	156.80	153.55	152.13	128.62	117.79	107.79	107.24
P-ETP	-113.85	-117.52	-154.95	-152.23	-152.19	-96.24	-56.88	-69.61	-57.87	-81.71	-98.54	-106.19
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AR	-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR	22.15	5.41	3.18	10.31	22.37	60.56	96.67	82.52	70.75	36.08	9.25	1.05
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	-95.85	-117.52	-154.95	-152.23	-152.19	-96.24	-56.88	-69.61	-57.87	-81.71	-98.54	-106.19

Abreviaturas: P: Precipitación (mm); ETP: Evapotranspiración (mm); R: Reserva (mm); AR: Variación de la reserva (mm); ETR: Evapotranspiración Real (mm); E: Excedente o esorrentía (mm) y D: Déficit hídrico anual (mm).

En la siguiente figura se presenta el comportamiento del balance hídrico mensual para la zona norte del acuífero, en la cual se puede observar que las salidas suman un valor mayor que las entradas, presentando un déficit considerable en la mayor parte del año (Figura 39).

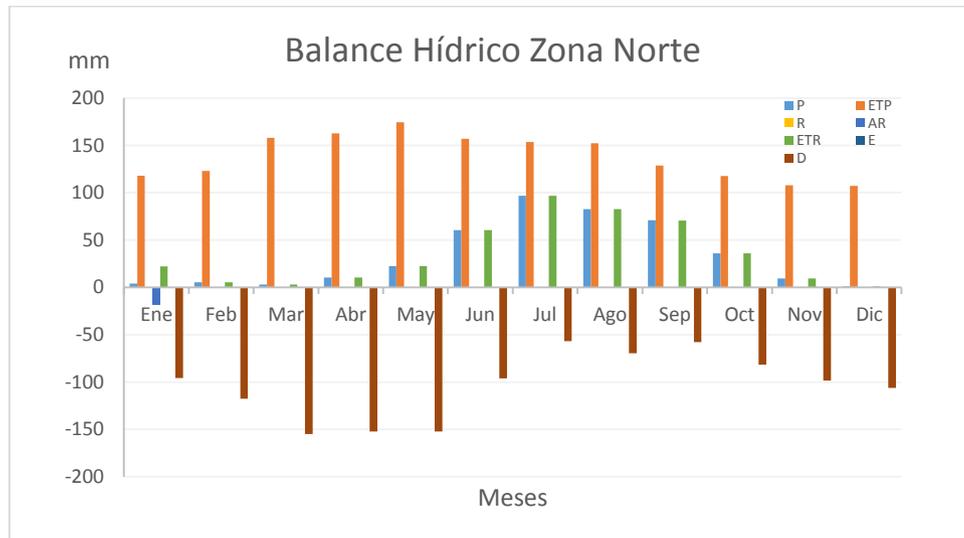


Figura 39. Histograma del balance hídrico de la zona norte del acuífero

A continuación se presenta el Balance Hídrico para la zona centro del acuífero, los resultados obtenidos se pueden observar en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Balance hídrico zona centro.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	7.68	4.38	5.30	17.54	33.77	75.78	90.15	76.26	94.37	47.89	13.01	0.62
ETP	87.83	93.49	137.41	142.22	154.04	132.62	127.79	124.51	97.76	88.65	84.50	80.10
P-ETP	-80.15	-89.11	-132.11	-124.68	-120.27	-56.84	-37.64	-48.25	-3.39	-40.76	-71.49	-79.48
R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AR	-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR	25.68	4.38	5.3	17.54	33.77	75.78	90.15	76.26	94.37	47.89	13.01	0.62
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	-62.15	-89.11	-132.11	-124.68	-120.27	-56.84	-37.64	-48.25	-3.39	-40.76	-71.49	-79.48

Abreviaturas: P: Precipitación (mm); ETP: Evapotranspiración (mm); R: Reserva (mm); AR: Variación de la reserva (mm); ETR: Evapotranspiración Real (mm); E: Excedente o escorrentía (mm) y D: Déficit hídrico anual (mm).

En la siguiente figura se presenta el comportamiento del balance hídrico mensual para la zona centro del acuífero, en la cual se puede observar que al igual que en la parte norte, las salidas suman un valor mayor que las entradas, presentando un déficit menor (Figura 40).

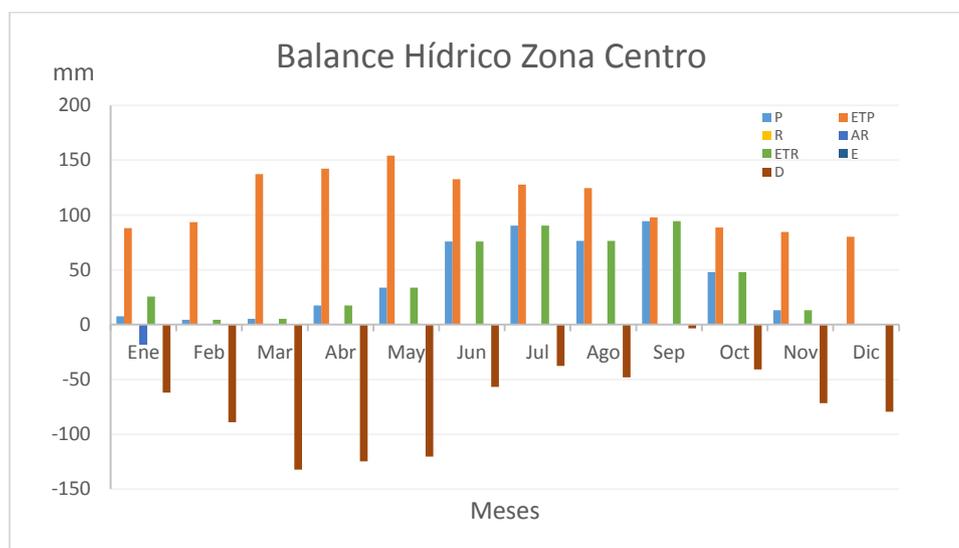


Figura 40. Histograma del balance hídrico de la zona centro del acuífero

Por último se presenta el Balance Hídrico para la zona sur del acuífero, los resultados obtenidos se pueden observar en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Balance hídrico zona sur.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	5.61	3.52	8.90	21.24	44.80	115.48	136.75	139.74	157.14	81.17	13.08	7.97
ETP	101.57	115.67	157.04	164.60	163.91	130.13	118.07	115.51	99.60	91.27	88.48	94.94
P-ETP	-95.96	-112.15	-148.14	-143.36	-119.11	-14.65	18.62	24.23	57.54	-10.1	-75.4	-86.97
R	0	0	0	0	0	0	18	18	18	7.9	0	0
AR	0	0	0	0	0	0	18	8.33	0	-10.09	-7.9	0
ETR	5.61	3.52	8.9	21.24	44.8	115.48	118.13	115.51	99.6	91.27	20.98	7.97
E	0	0	0	0	0	0	0.62	24.23	57.54	0	0	0
D	-95.96	-112.15	-148.14	-143.36	-119.11	-14.65	0	0	0	0	-67.5	-86.97

Abreviaturas: P: Precipitación (mm); ETP: Evapotranspiración (mm); R: Reserva (mm); AR: Variación de la reserva (mm); ETR: Evapotranspiración Real (mm); E: Excedente o escorrentía (mm) y D: Déficit hídrico anual (mm).

A continuación en la Figura 41, se presenta el comportamiento del balance hídrico mensual para la zona centro del acuífero, en la cual se puede observar que para los meses de julio a octubre no se presenta déficit hídrico en comparación con las otras zonas (norte y centro).

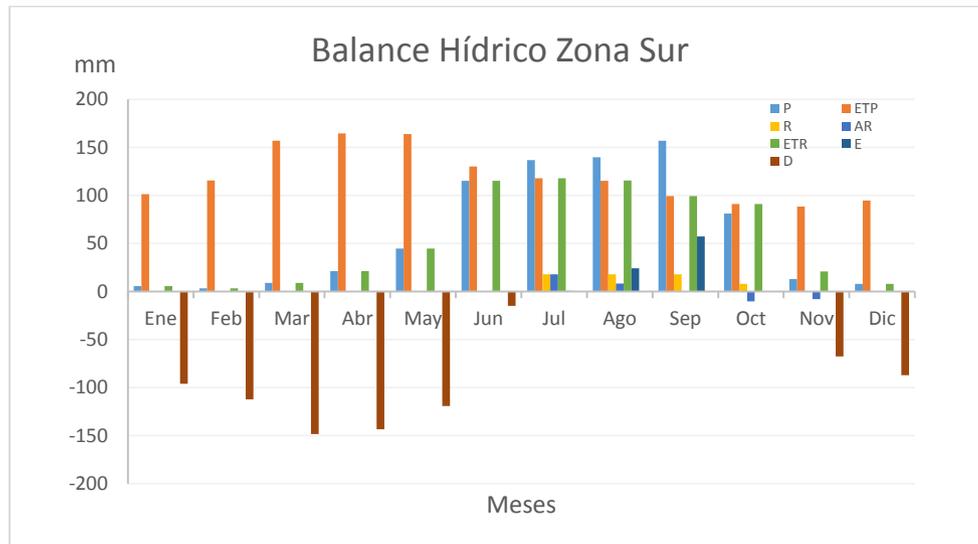


Figura 41. Histograma del balance hídrico de la zona sur del acuífero

Finalmente se presenta el balance total del acuífero para las tres zonas, en la cual se puede apreciar como en la parte norte es donde existe mayor déficit hídrico y en menor proporción le sigue la parte centro y sur (Figura 42).

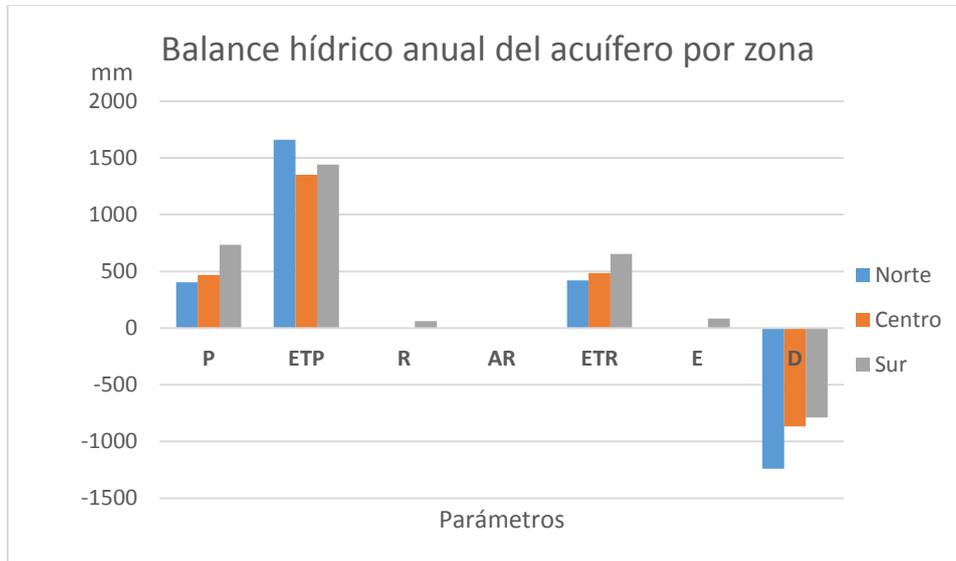


Figura 42. Histograma del balance hídrico total de las zonas norte, centro y sur

5.6. Cálculo de los requerimientos de agua para el cultivo

Para estimar el requerimiento de agua para las diferentes zonas (norte, centro y sur) del acuífero, se tomó en cuenta los periodos de siembra y cosecha de los cultivos, además de los datos de Precipitación, Evapotranspiración Potencial, K_c y Evapotranspiración del cultivo (ET_c) la cual se calcula como se observa a continuación.

$$ET_c = K_c * ETP \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm)

K_c = coeficiente del cultivo (adimensional)

ETP = evapotranspiración potencial (mm)

En seguida se presentará el requerimiento de agua para el cultivo de maíz como ejemplo durante su periodo de crecimiento. Los valores de K_c (Coeficiente del cultivo)

se tomaron de la tabla de coeficiente del cultivo Kc de FAO 56 (Cuadro 14) (Allen *et al.*, 2006).

Cuadro 14. Coeficiente del cultivo (kc)

Cultivo	Kc_ini	Kc_med	Kc_fin
Ajo	0.7	1.00	0.70
Calabacita	0.5	0.98	0.75
Cebolla	0.7	1.00	1.00
Chile	0.6	1.15	0.80
Frijol	0.4	1.15	0.35
Maíz	0.3	1.20	0.35
Jitomate	0.6	1.15	0.80
Pepino	0.6	1.00	0.75
Tomate cáscara	0.6	1.15	0.80

5.6.1 Relación entre la Precipitación, ETc, Periodo libre de heladas y la fecha de siembra.

A continuación se muestra en las siguientes figuras el comportamiento y la relación de la precipitación, la ETc, ETc 0.5 y el periodo libre de heladas divididas en tres zonas correspondiente al acuífero en estudio: norte (Tecozautla), centro (Huichapan) y sur (Nopala). La agrupación de estas zonas, fue a partir de la ubicación de cada una de las estaciones meteorológicas y de la obtención de la media de cada uno de los factores; precipitación, ETc y Periodo libre de heladas.

En el Cuadro 15 referente a la zona norte del área de estudio, se puede observar como existe una diferencia considerable entre los valores de precipitación y la ETc, lo cual indica que llueve mucho menos de lo que se evapotranspira dando como resultado un déficit de agua en la mayoría de su periodo de crecimiento excepto en el mes de junio, además en la Figura 43, se presenta el periodo libre de heladas (PLH)

que va del 04 de marzo al 07 de noviembre, lo cual permite apreciar que durante la temporada de lluvias y el periodo de crecimiento, no existe riesgo de que se presente una helada.

Cuadro 15. Requerimiento y déficit hídrico para el cultivo de maíz en la zona norte

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
ETP	118.00	122.93	158.13	162.54	174.56	156.80	153.55	152.13	128.62	117.79	107.24	108.42	
ETP 0.5	59.00	61.46	79.07	81.27	87.28	78.40	76.78	76.06	64.31	58.90	53.62	54.21	
Kc					0.30	0.75	1.20	1.20	0.78	0.35			
ETc					52.37	117.6	184.26	182.55	99.68	41.23			
P	4.15	5.41	3.18	10.31	22.37	60.57	96.67	82.52	70.75	36.08	9.25	1.05	
Def					-57.03	0	-87.59	-100.04	-28.93	-5.15			-306.37

Abreviaturas: ETP: Evapotranspiración Potencial (mm); Kc: Coeficiente del cultivo (adimensional); ETc: Evapotranspiración del Cultivo (mm); P: Precipitación (mm) y D: Déficit hídrico anual (mm).

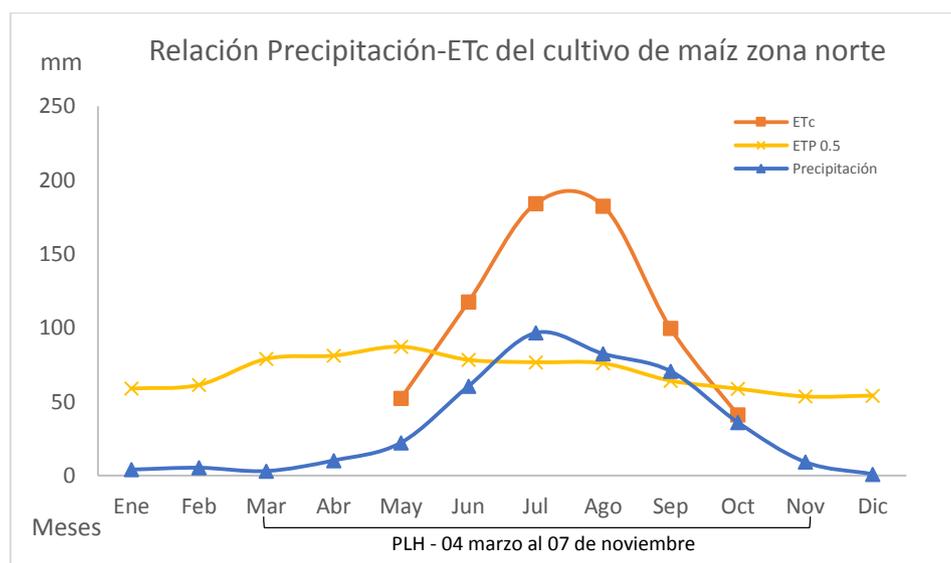


Figura 43. Relación de la Precipitación, ETc y ETP 0.5 con el PLH en la zona norte.

En el Cuadro 16, referente a la zona centro del área de estudio, se puede observar que existe una diferencia aun considerable entre los valores de precipitación y la ETc, principalmente en los meses de julio a septiembre, indicando un déficit hídrico en esos meses, excepto en las etapas inicial y final del periodo de crecimiento. Además en la Figura 44, se presenta el periodo libre de heladas que va del 22 de marzo al 28 de

octubre, lo cual permite apreciar que durante la temporada de lluvias, no existe riesgo de que se presente una helada.

Cuadro 16. Requerimiento y déficit hídrico para el cultivo de maíz en la zona centro

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
ETP	87.83	93.49	137.41	142.22	154.04	132.62	127.79	124.51	97.76	88.65	84.50	80.10	
ETP 0.5	43.92	46.75	68.70	71.11	77.02	66.31	63.90	62.26	48.88	44.33	42.25	40.05	
Kc					0.30	0.75	1.20	1.20	0.78	0.35			
ETc					99.46	39.79	153.35	149.42	75.77	31.03			
P	7.68	4.38	5.30	17.54	33.77	75.78	90.15	76.26	94.37	47.89	13.01	0.62	
Def					-23.69	0	-63.20	-73.15	0				-171.75

Abreviaturas: ETP: Evapotranspiración Potencial (mm); Kc: Coeficiente del cultivo (adimensional); ETc: Evapotranspiración del Cultivo (mm); P: Precipitación (mm) y D: Déficit hídrico anual (mm).

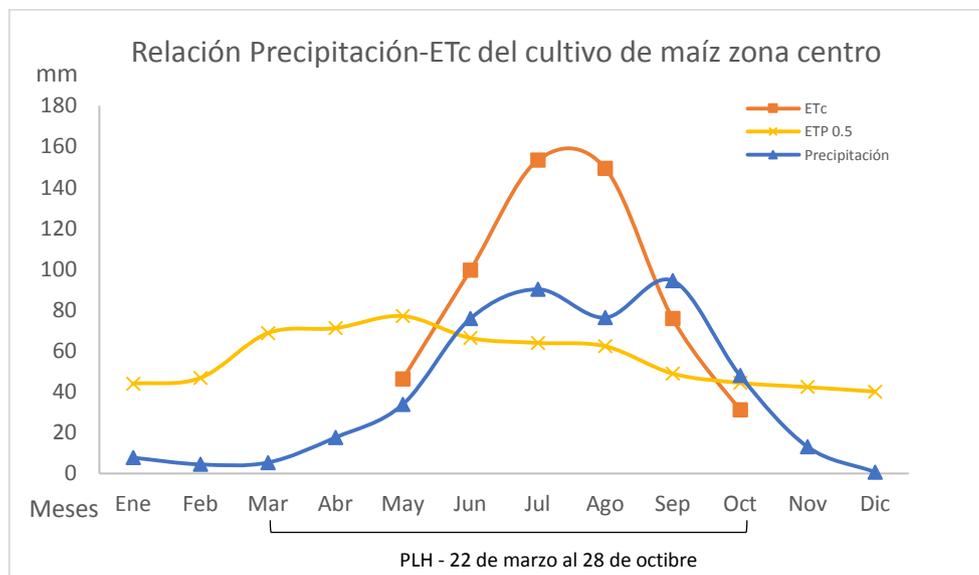


Figura 44. Relación de la Precipitación, ETc y ETP 0.5 con el PLH en la zona centro.

En el Cuadro 17, referente a la zona sur del área de estudio, se puede observar que la diferencia entre precipitación y la ETc es casi nula, lo cual indica que en esta zona durante periodo durante el periodo de crecimiento no existe gran déficit de agua, además en la Figura 45, se presenta el periodo libre de heladas que va del 09 de abril

al 15 de octubre, aproximadamente 6 meses del año, pudiendo apreciar que durante la temporada de lluvias no existe riesgo de que se presente una helada.

Cuadro 17. Requerimiento y déficit hídrico para el cultivo de maíz en la zona sur

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
ETP	101.57	115.67	157.04	164.60	163.91	130.13	118.07	115.51	99.60	91.27	88.48	94.94	
ETP 0.5	50.78	57.83	78.52	82.30	81.95	65.06	59.04	57.75	49.80	45.63	44.24	47.47	
Kc					0.30	0.75	1.20	1.20	0.78	0.35			
ETc					49.17	39.04	141.69	138.61	119.52	31.94			
P	5.61	3.52	8.90	21.24	44.80	115.48	136.75	139.74	157.14	81.17	13.08	1.97	
Def					-4.38	0	-4.94	0	0	0			-9.32

Abreviaturas: ETP: Evapotranspiración Potencial (mm); Kc: Coeficiente del cultivo (adimensional); ETc: Evapotranspiración del Cultivo (mm); P: Precipitación (mm) y D: Déficit hídrico anual (mm).

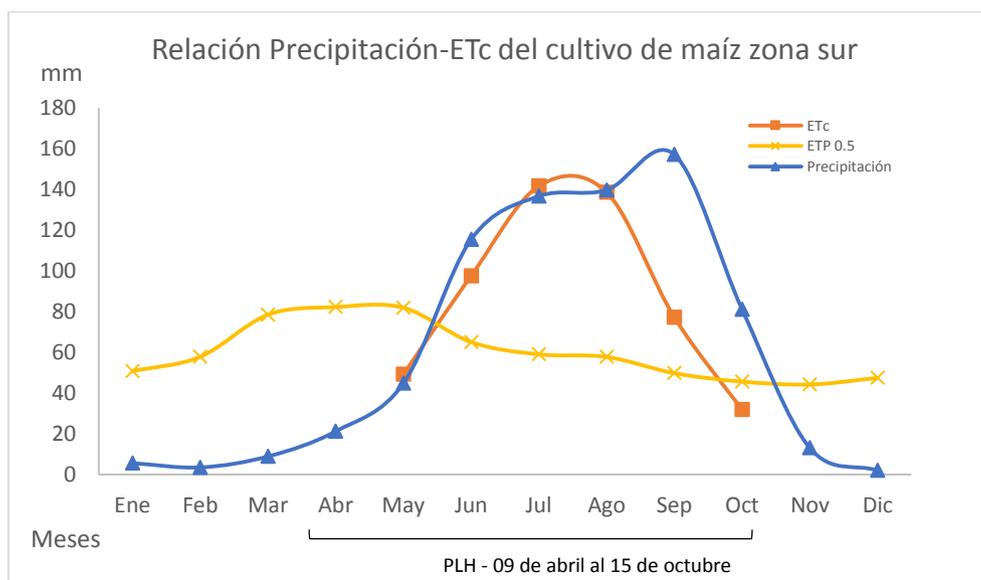


Figura 45. Relación de la Precipitación, ETc y ETP 0.5 con el PLH en la zona sur.

De acuerdo a las figuras anteriores, se recomienda sembrar a partir del periodo libre de heladas, para el caso de la zona norte posterior al 4 de marzo, para la zona centro a partir del 22 de marzo y para el caso de la zona sur del 9 de abril en adelante, aunque el periodo de lluvias en esas fechas aun no iniciarían se recomienda que el agua requerida se suministre con riego, para de esta forma aprovechar lo más posible cuando el periodo de lluvias inicie y ahorrar agua, evitando la sobreexplotación del acuífero.

Los resultados de requerimiento y déficit hídrico de los cultivos restantes de las zonas norte, centro y sur, se encuentran en los Anexos II.

5.7. Zonificación Edáfica

5.7.1. Zonificación por Textura del suelo

El resultado final fue un mapa de polígonos de aptitud de textura, agrupados en solo 2 grupos, ya que la zona de estudio solo presenta estos dos tipos de textura como se presenta a continuación en la Figura 46.

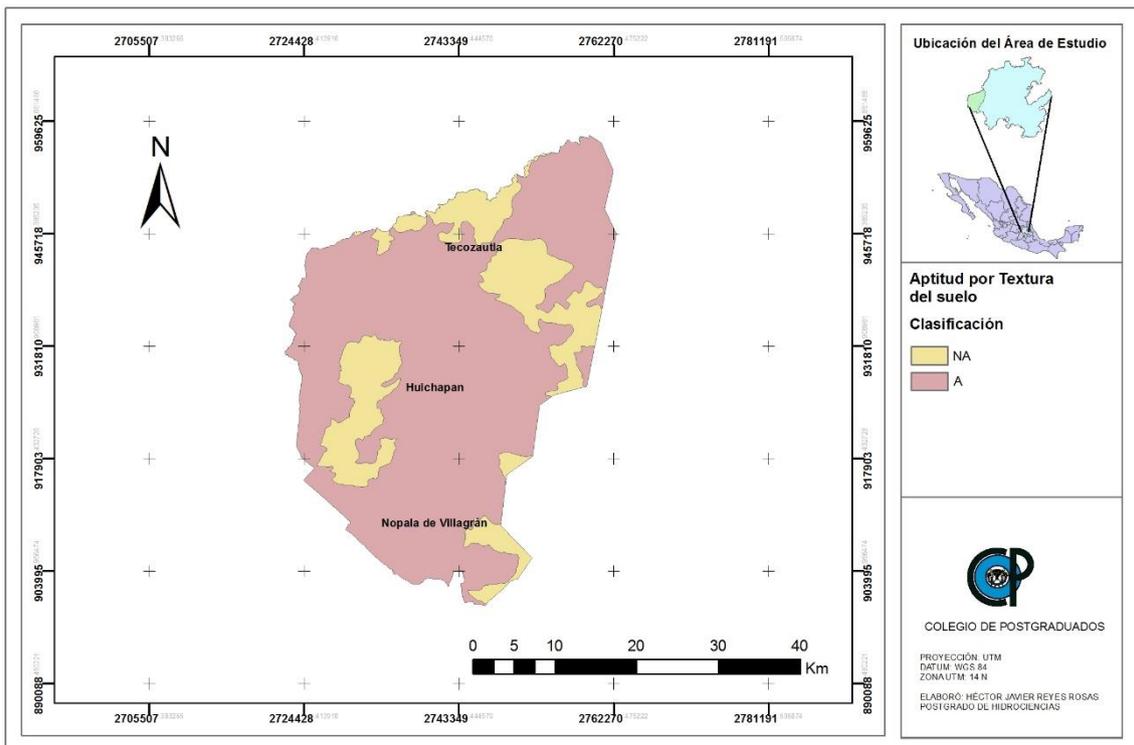


Figura. 46. Mapa de aptitud por Textura del suelo.

En la figura anterior se puede apreciar que la textura media es la que domina en el área de estudio, representando un porcentaje del 78%, en tanto la textura fina representa el 22%.

Cuadro 18. Clasificación de aptitud por textura

Clase Textura	Clasificación de la aptitud
Gruesa	No Apto
Media	Apto
Fina	No Apto

De acuerdo a los requerimientos de los cultivos presentados en el Cuadro 4, y a la clasificación de la aptitud en el Cuadro 18, se puede observar que todos los cultivos tienen un buen desarrollo en una textura media y en base al mapa generado en la Figura 25, el 78% de la superficie de la zona de estudio es Apto y el resto de la superficie corresponde a No Apto.

5.7.2. Zonificación por profundidad del suelo

Para la variable de profundidad del suelo se hizo la clasificación en tres clases de aptitud como se puede apreciar en el Cuadro 19, de acuerdo a los requerimientos de profundidad de los cultivos de interés (Cuadro 4), estos prefieren suelos con una profundidad que va de >50 a 150 cm. En la Figura 47 se puede apreciar la distribución de las profundidades de en la zona de estudio.

Cuadro 19. Clasificación de aptitud por profundidad del suelo

Profundidad del suelo (cm)	Clasificación de la aptitud
>50	Apto
>25 - <50	mA
<25	No Apto

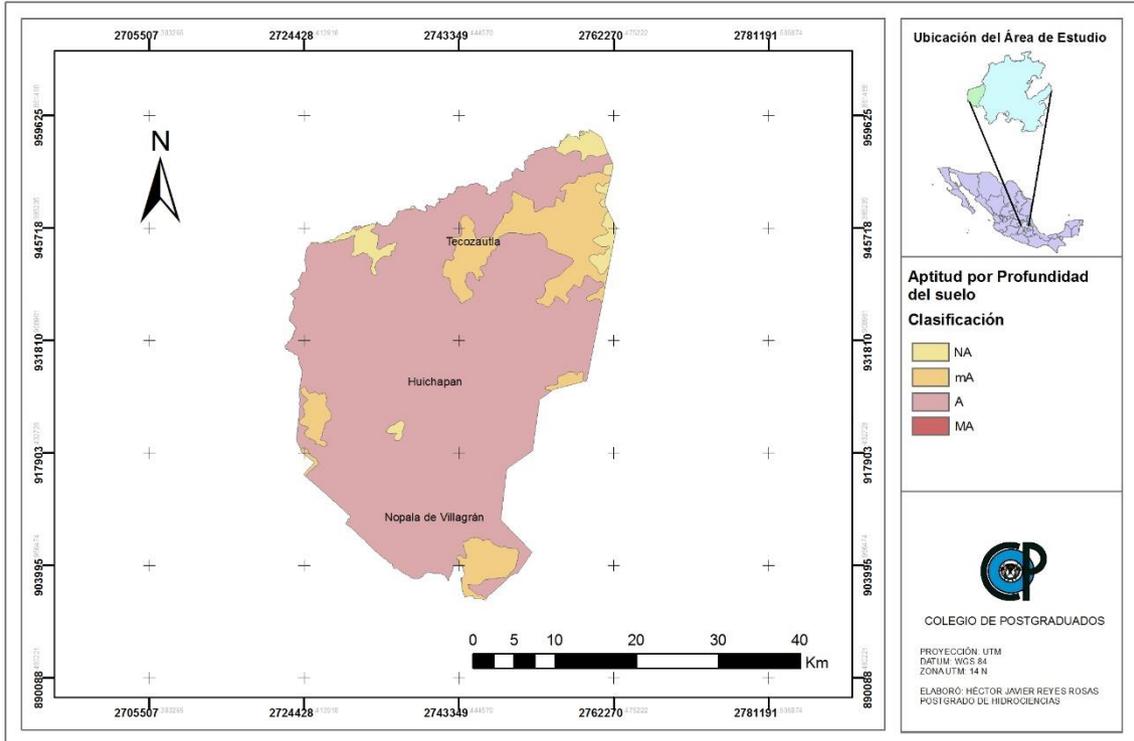


Figura 47. Mapa de aptitud por Profundidad del suelo

De acuerdo a la figura anterior, se puede observar que existe un área considerable con suelos aptos que representa un porcentaje del 83% que pertenecen en gran mayoría a suelos tipo Feozem, la otra parte que lo complementa son suelos Vertisoles, la parte que representa a los suelos delgados representa un 17% que está integrada por suelos como Litosoles, Rendzina, Luvisoles y Planosoles (Figura 47).

En la Figura 48 se pueden observar los tipos de suelos que se encuentran en la zona de estudio y que de acuerdo a la clasificación de FAO/UNESCO (1989), existen 8 tipos de suelos (Cuadro 20)

Cuadro 20. Tipos de suelos de la zona de estudio

Clave	Nombre
I	Litosol
E	Rendzina
Hc	Feozem calcárico
Vp	Vertisol pélico
HI	Feozem lúvico
Hh	Feozem háplico
Wm	Planosol mólico
Lc	Luvisol crómico

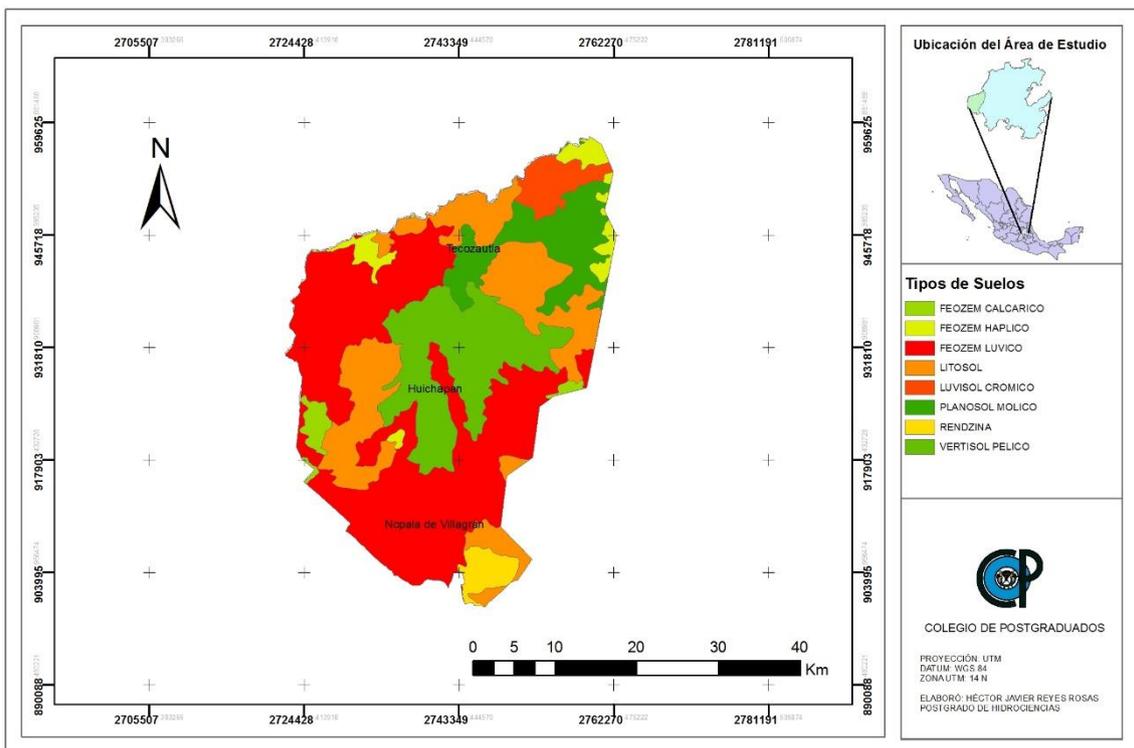


Figura 48. Distribución de los tipos de suelo en la zona de estudio.

De acuerdo a los requerimientos de los cultivos y a la clasificación de aptitud por profundidad se puede observar que la mayoría de los cultivos son aptos para un buen desarrollo en gran parte del territorio estudiado y que existen áreas marginalmente aptas y no aptas en menor proporción.

5.7.3. Zonificación por Pendiente (%)

Para la variable pendiente se hizo la siguiente clasificación como se observa en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Clasificación de aptitud por Pendiente

Clase Pendiente (%)	Clasificación de la aptitud
0 - <4	Muy Apto
4 ≥ a <8	Apto
8 ≥ a <16	marginalmente Apto
>16	No Apto

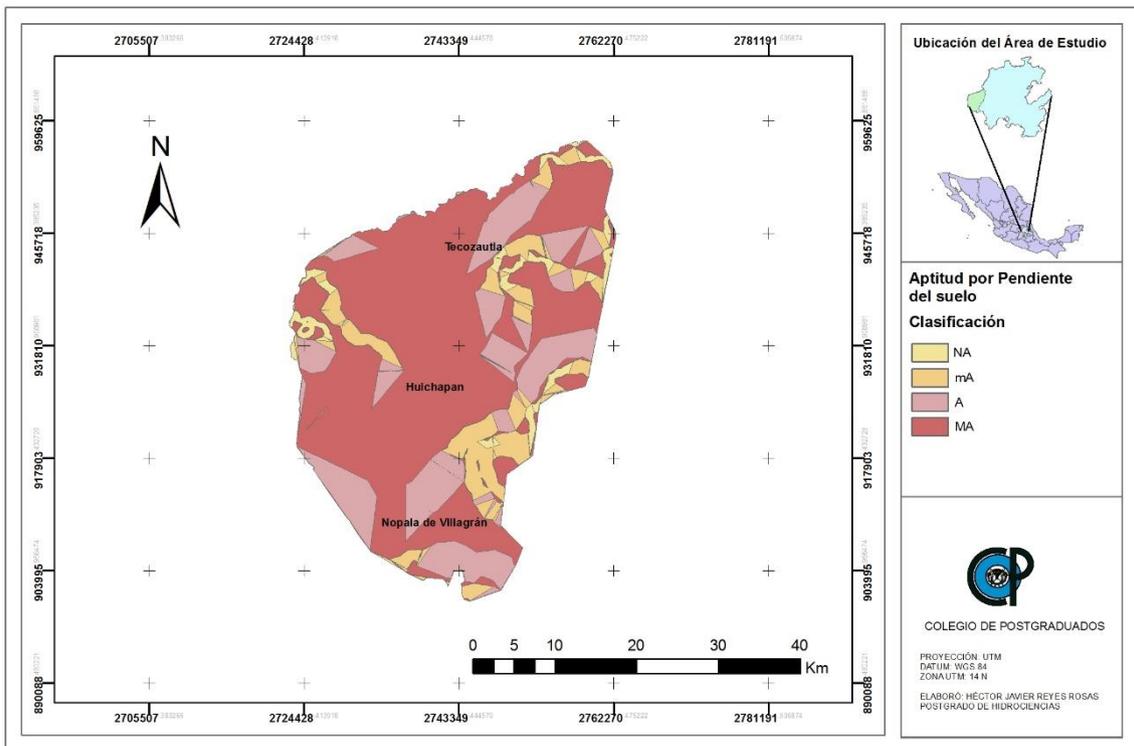


Figura 49. Mapa de aptitud por Pendiente del suelo

Con base en la Figura 49, se puede observar que la mayoría de la zona se encuentra entre una pendiente de 0 – 4% y que representa una pendiente muy apta para el desarrollo de los cultivos y que representa un 62 % posteriormente con un 22% se encuentra un área apta y va de un rango de pendiente 4 – 8%, lo cual significa que el

88% de la zona se encuentra entre la clasificación de Muy Apto a Apto, por lo tanto y de acuerdo a los requerimientos de los cultivos (Cuadro 4) de la zona de interés, todos los cultivos mencionados anteriormente requieren de una pendiente de 0 – 4%, por lo cual se puede decir que en una gran parte del área de estudio estos cultivos se pueden desarrollar.

5.8. Mapa de clases de aptitud de Suelo

Teniendo como base los mapas temáticos de textura, profundidad y pendiente en las figuras anteriores, se realizó el álgebra de mapas para la variable suelo de la siguiente manera: si teníamos una clase de aptitud por Textura Muy Apta (MA), una clase de aptitud por Profundidad marginalmente Apta (mA) y una clase de aptitud por Pendiente No Apta (NA), se presentaba una demeritación de aptitud por parte de la Pendiente, lo cual nos indica que es el factor limitante que restringe la clase de aptitud de textura y profundidad, a continuación en el Cuadro 22, se presentan algunos ejemplos de algebra de mapas y como las clases se van demeritando.

Cuadro 22. Demeritación de la Aptitud por clase de Suelos

Clasificación Textura		Clasificación Profundidad		Clasificación Pendiente		Demeritación de Aptitud
MA	+	A	+	A	=	A
A	+	mA	+	mA	=	mA
mA	+	A	+	NA	=	NA
A	+	mA	+	NA	=	NA
MA	+	A	+	NA	=	NA

A continuación en la Figura 50, se puede apreciar que existe un área considerable de aptitud Apta de 77 144 ha y una superficie aproximada de 68 851 ha entre mA y NA.

Cabe mencionar que para la obtención de este mapa de suelos, el principal factor limitante fue la pendiente, ya que es en las zonas más altas donde se presentan aptitudes mA y NA.

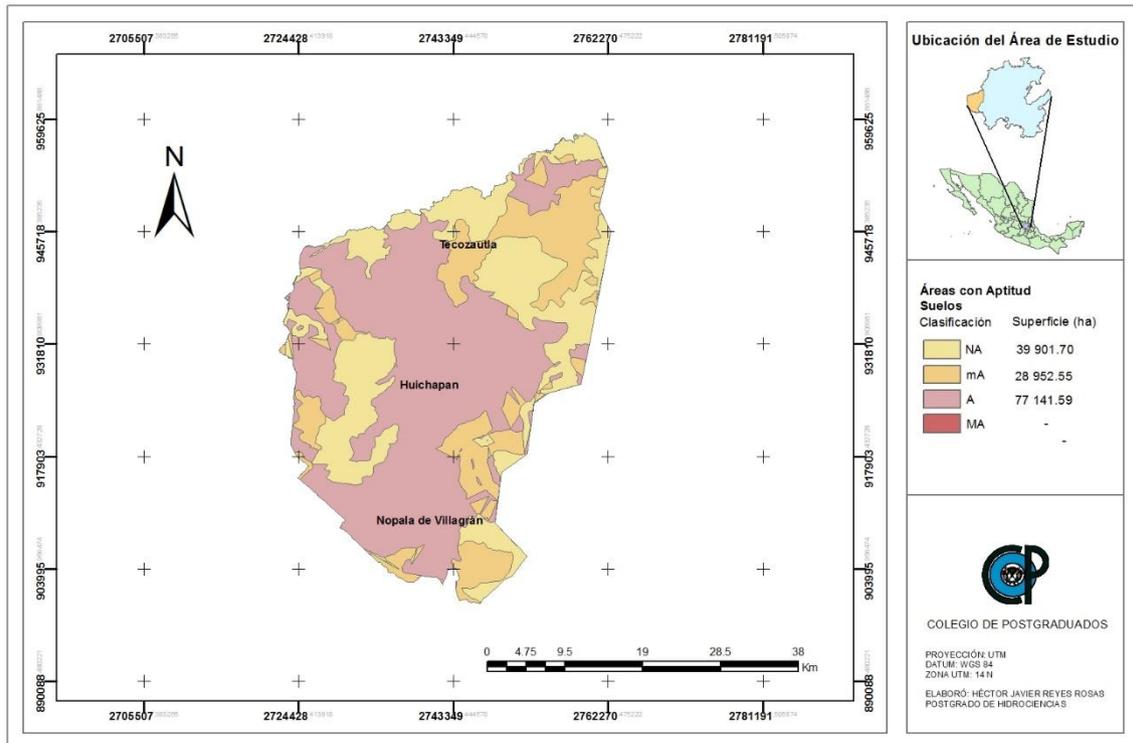


Figura 50. Mapa de clases de aptitud de suelo.

5.9. Álgebra de Mapas de las variables edafoclimáticas por cultivo

Para los mapas resultantes se hicieron de la siguiente forma; a partir de los mapas temáticos mostrados en los apartados anteriores, primeramente se mostraran la zonificación tomando solo en cuenta la parte edáfica y la térmica, posteriormente se mostraran zonificación sumándole a estos factores la parte de la precipitación con la intención de mostrar la diferencia de resultados sumando este último factor. Para el álgebra de mapas se siguió la misma metodología que se mencionó anteriormente en

el apartado de Mapa de Clases de Aptitud de Suelo en el cual el factor limitante es el que restringiría y demeritaría la clase de aptitud.

Las Figuras que se muestran a continuación de la 51 a la 54 representan la zonificación tomando en cuenta solo la parte edáfica y la térmica.

Como se puede apreciar en las figuras siguientes, existe una superficie considerable con una aptitud Apta para la mayoría de los cultivos, en la Figura 51 se puede observar que para los cultivos Ajo, Cebolla, Chile y Pepino existe una superficie 77 144.08 ha, para el caso del cultivo de la calabacita en la Figura 52 muestra una superficie de 66 801.54 ha y para el caso de los cultivos de Frijol, Jitomate y Maíz en la Figura 53 se muestra una superficie de 68 696.94 ha, solamente el cultivo de Tomate de cáscara en la Figura 54 presenta una superficie reducida de 12 899. 59 ha en comparación con los otros cultivos, ya que la mayoría de la superficie de estudio se encuentra entre mA y NA.

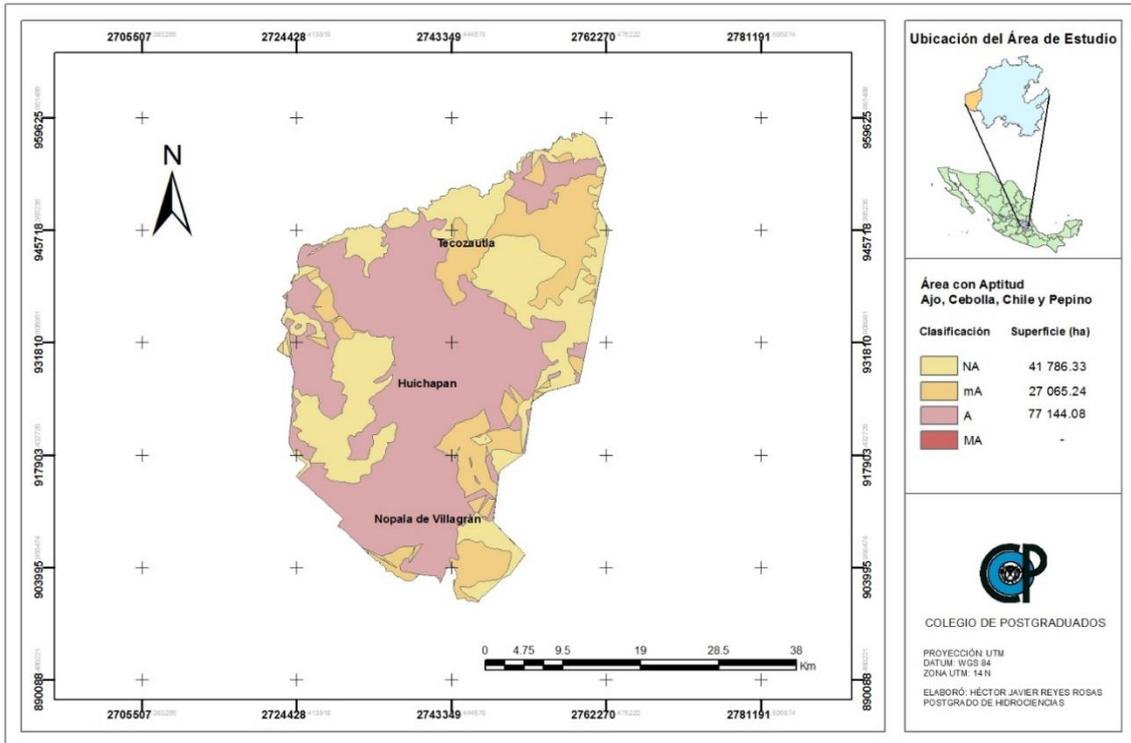


Figura 51. Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica de los cultivos de Ajo, Cebolla, Chile y Pepino.

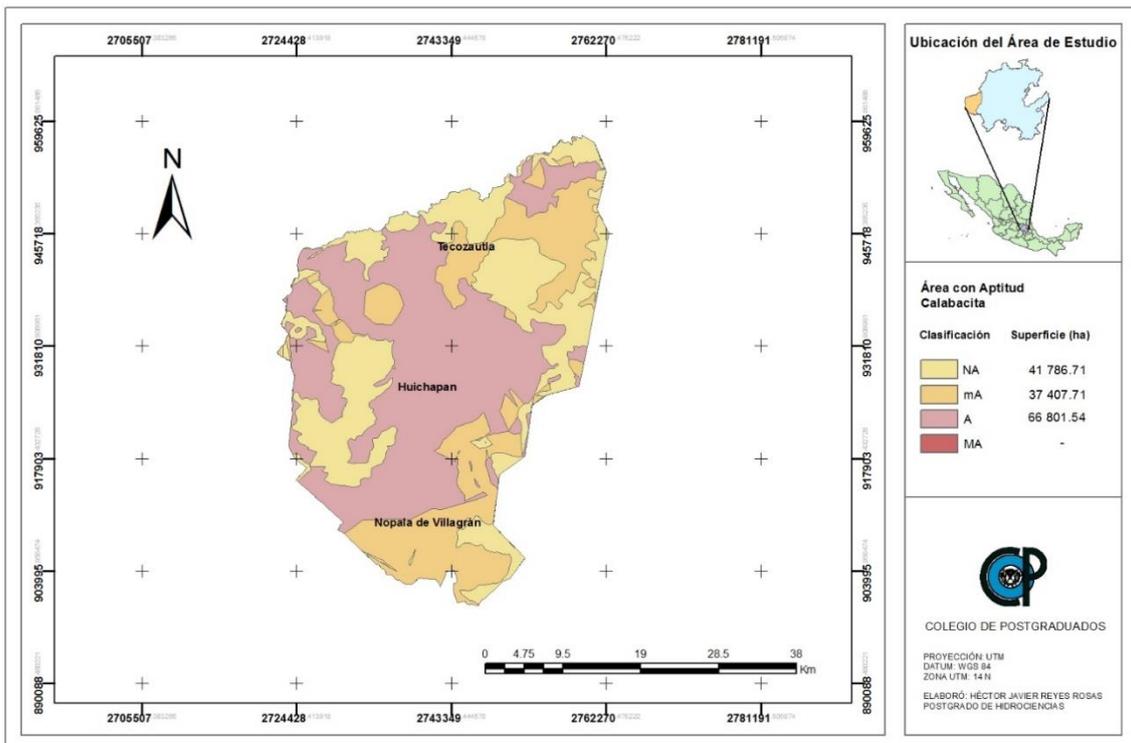


Figura 52. Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica del cultivo de Calabacita.

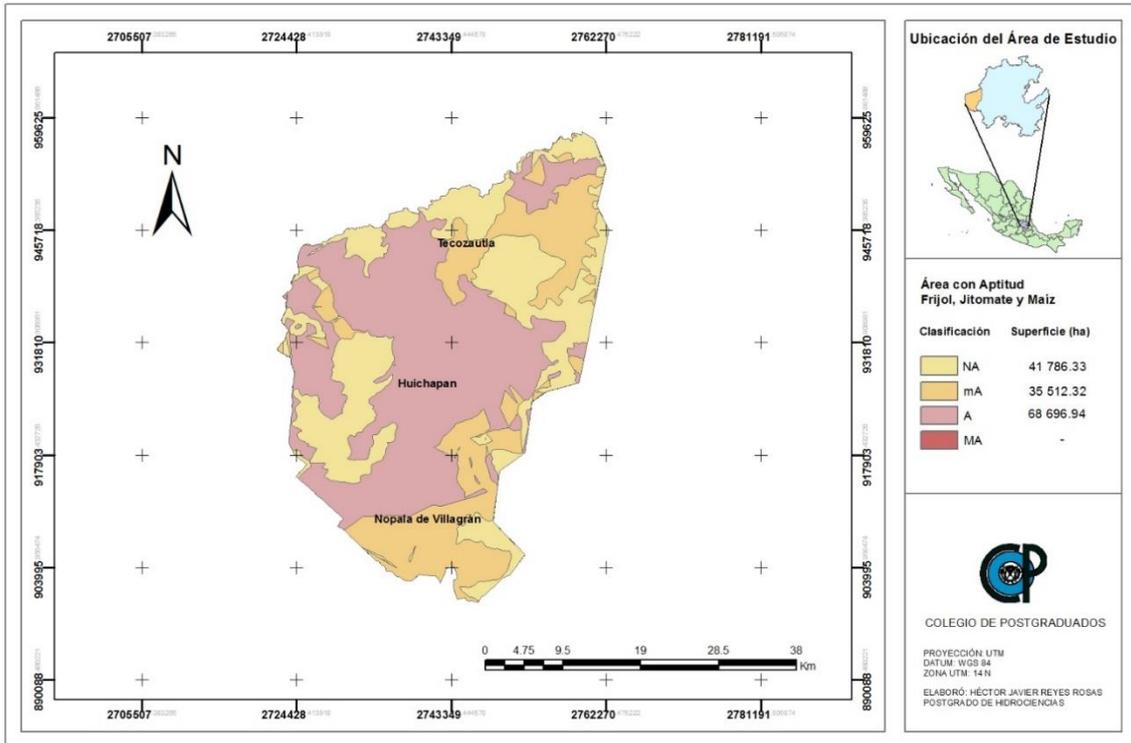


Figura 53. Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica de los cultivos de Frijol, Jitomate y Maíz.

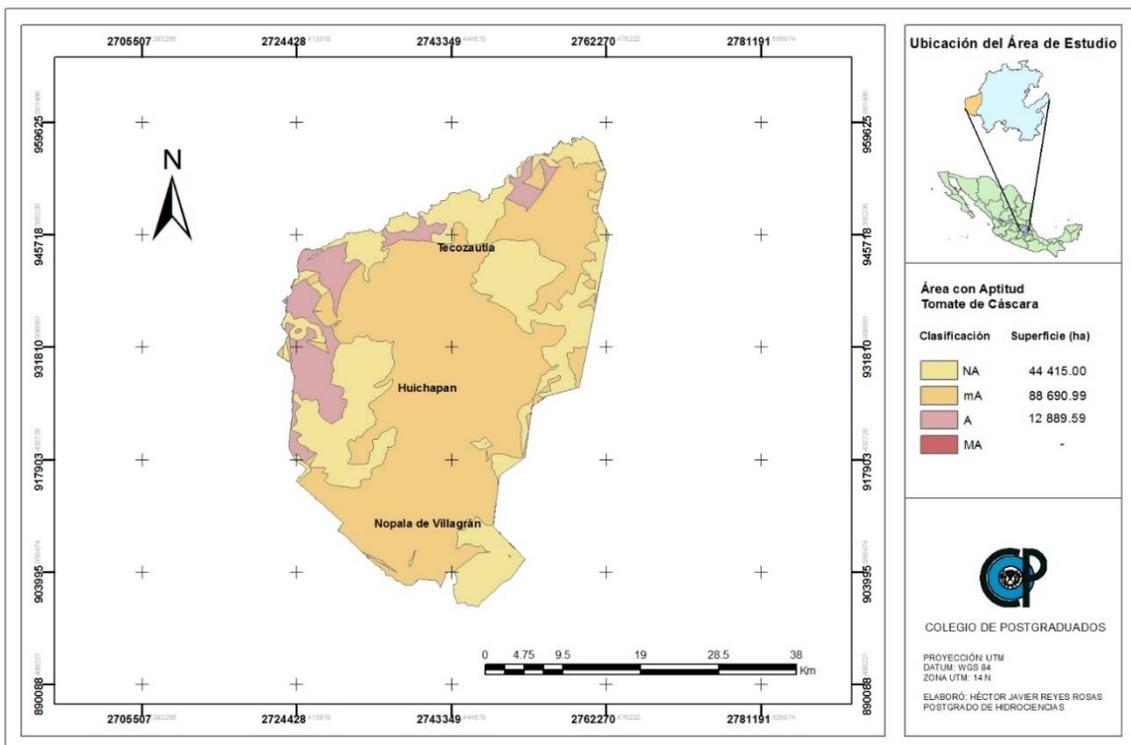


Figura 54. Localización de áreas con aptitud térmica y edáfica del cultivo de Tomate de cáscara.

5.10. Algebra de Mapas de las variables suelos, temperatura y precipitación

Las figuras que se muestran a continuación de la 55 a la 62 representan la zonificación tomando en cuenta la parte edáfica, térmica y precipitación.

Como se puede apreciar en las figuras siguientes, son pocos los cultivos que cuentan con una superficie Apta considerable, como lo es la calabacita en la Figura 56 la cual presenta un superficie de 62 805.67 ha, sin embargo la SIAP en el 2011 reportó una superficie sembrada de 702 ha con un rendimiento de 13.32 ton/ha, para el cultivo de la cebolla en la Figura 57 muestra una superficie de 77 144.08 ha y se reportó una superficie sembrada de 22 ha con un rendimiento de 18 ton/ha, para el cultivo de chile en la Figura 58 muestra una superficie de 33 491.31 ha y se reportó una superficie sembrada de 50 ha con un rendimiento de 7.56 ton/ha, para el caso del cultivo de Frijol en la Figura 59 presenta una superficie de 64 700.65 ha, sin embargo se reportó una superficie sembrada de 8 305.92 ha con un rendimiento de 1.01 ton/ha. La superficie Apta para el cultivo del jitomate y el maíz en la Figura 60 fue de 25 050.25 ha, sin embargo se reportó una superficie sembrada de 398 ha con un rendimiento de 16 ton/ha para el jitomate y una superficie sembrada de 13 916 con un rendimiento de 2.2 ton/ha para el maíz. Por último para los cultivos de ajo, pepino y tomate de cascara en las Figuras 55, 61 y 62 respectivamente, se encuentran en áreas marginalmente Aptas y No Aptas lo cual indica que no tendrían un desarrollo exitoso dichos cultivos.

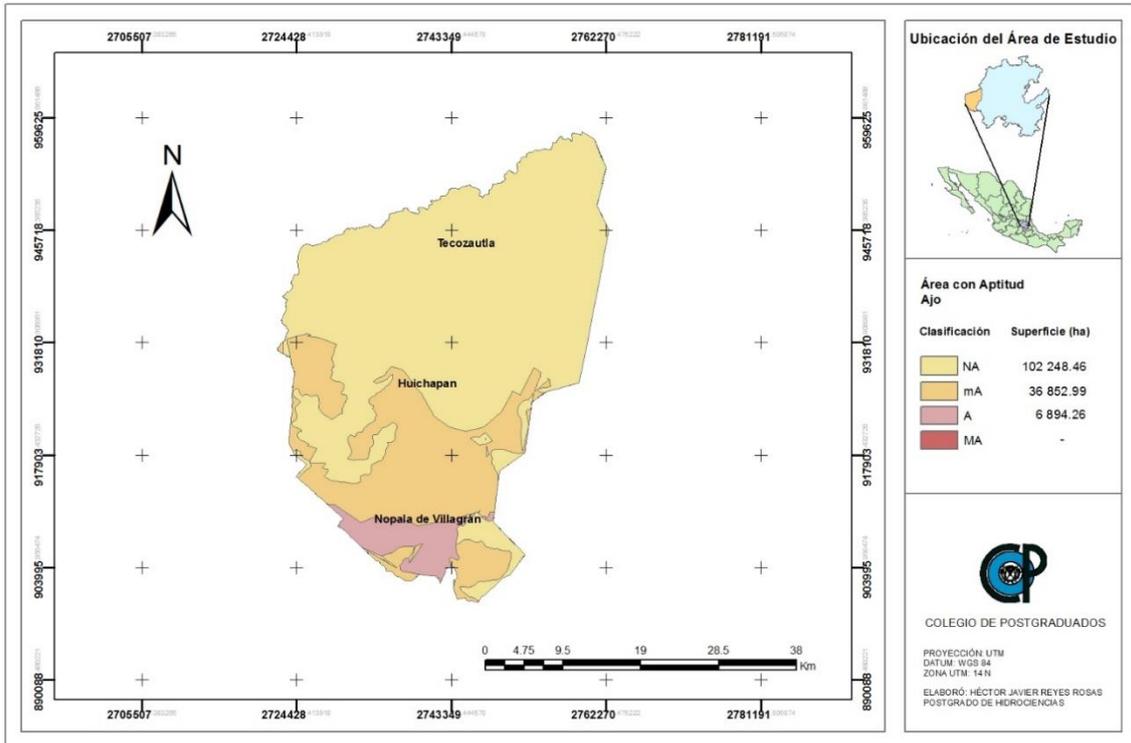


Figura 55. Zonificación para el cultivo de Ajo.

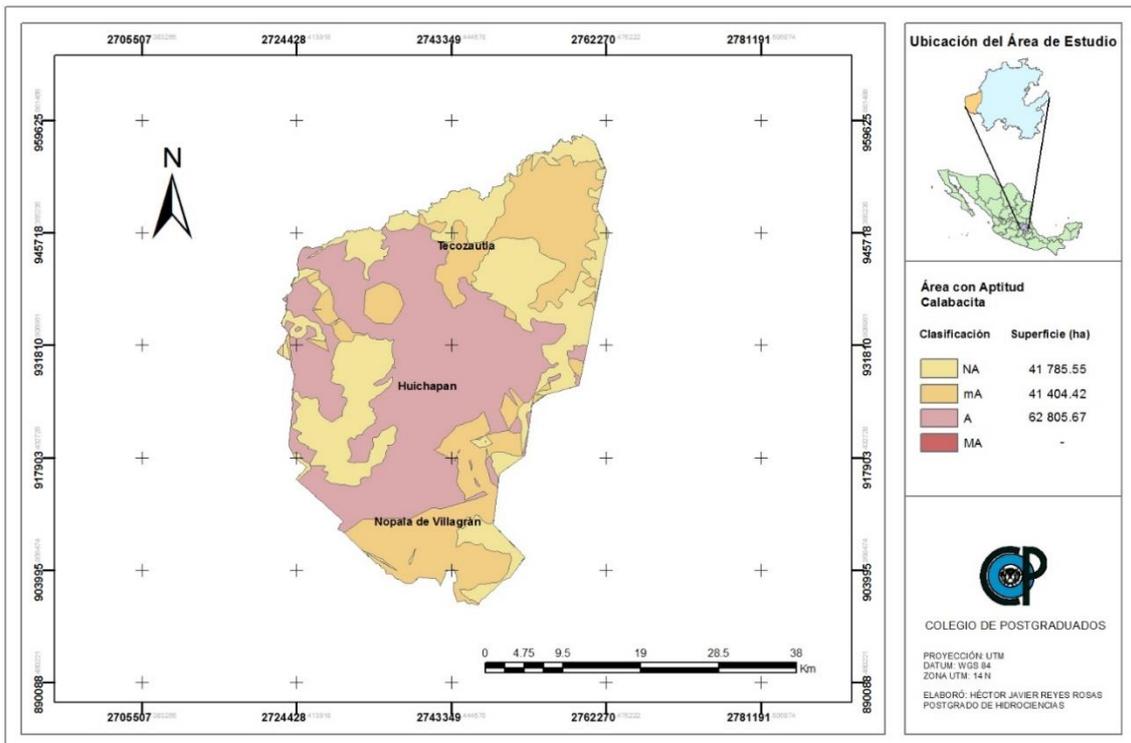


Figura 56. Zonificación para el cultivo de Calabacita.

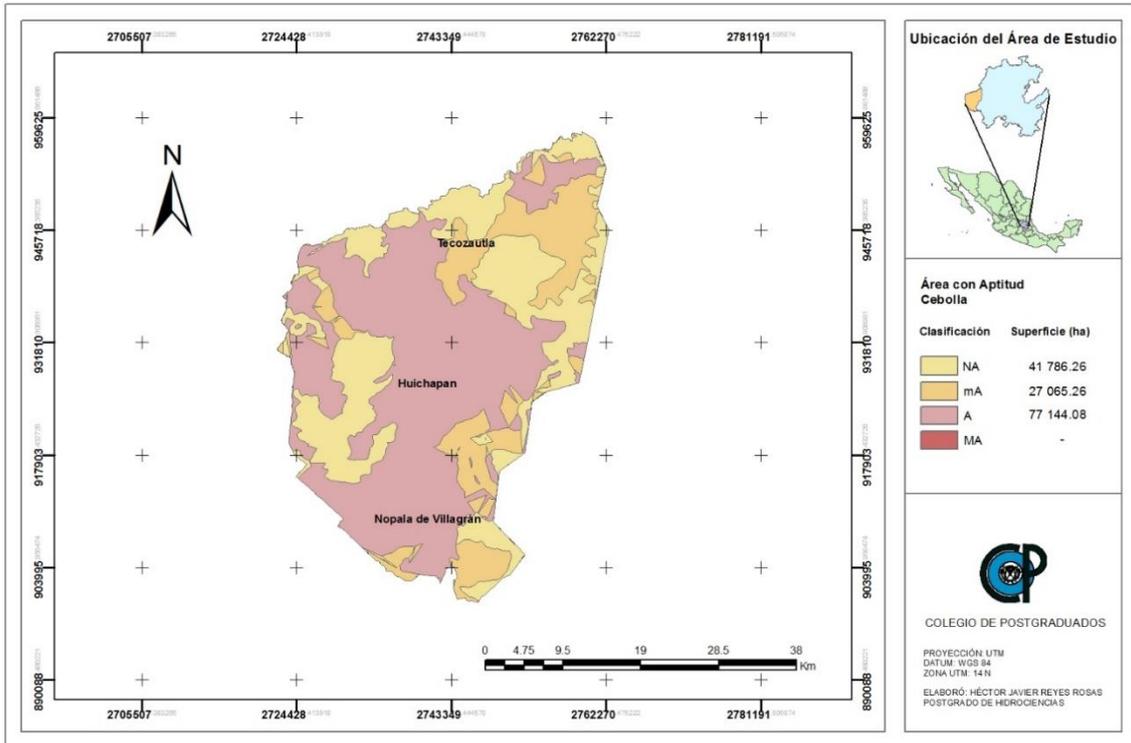


Figura 57. Zonificación para el cultivo de Cebolla.

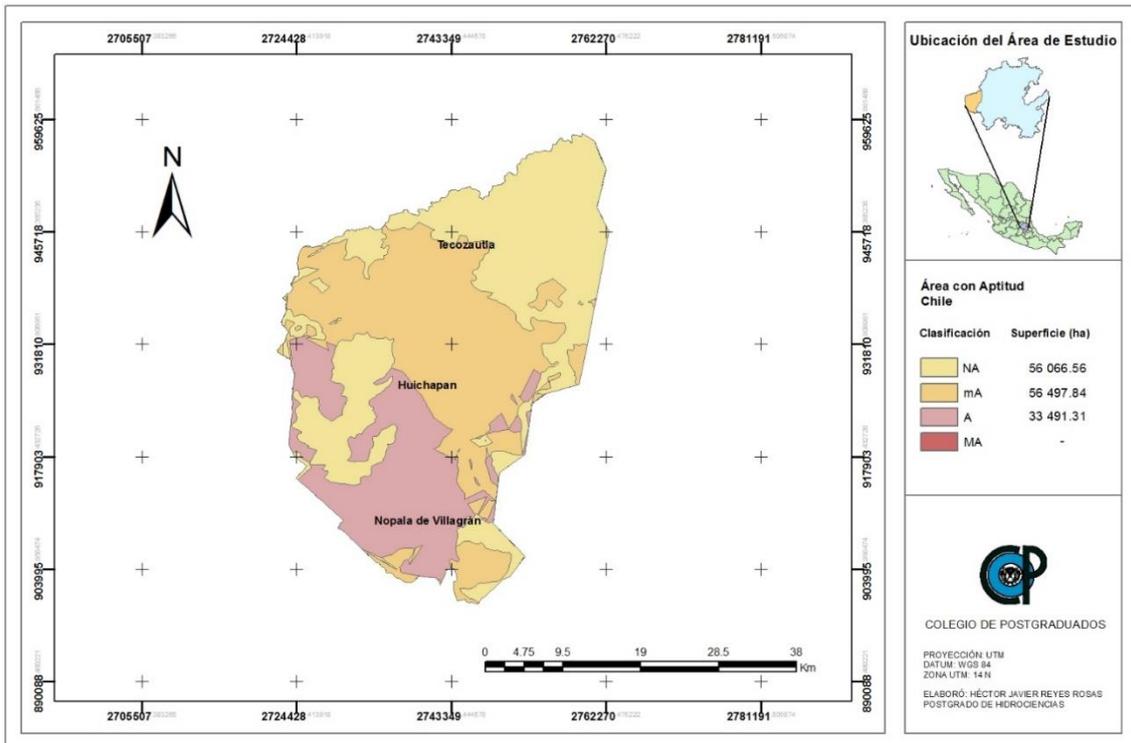


Figura 58. Zonificación para el cultivo de Chile.

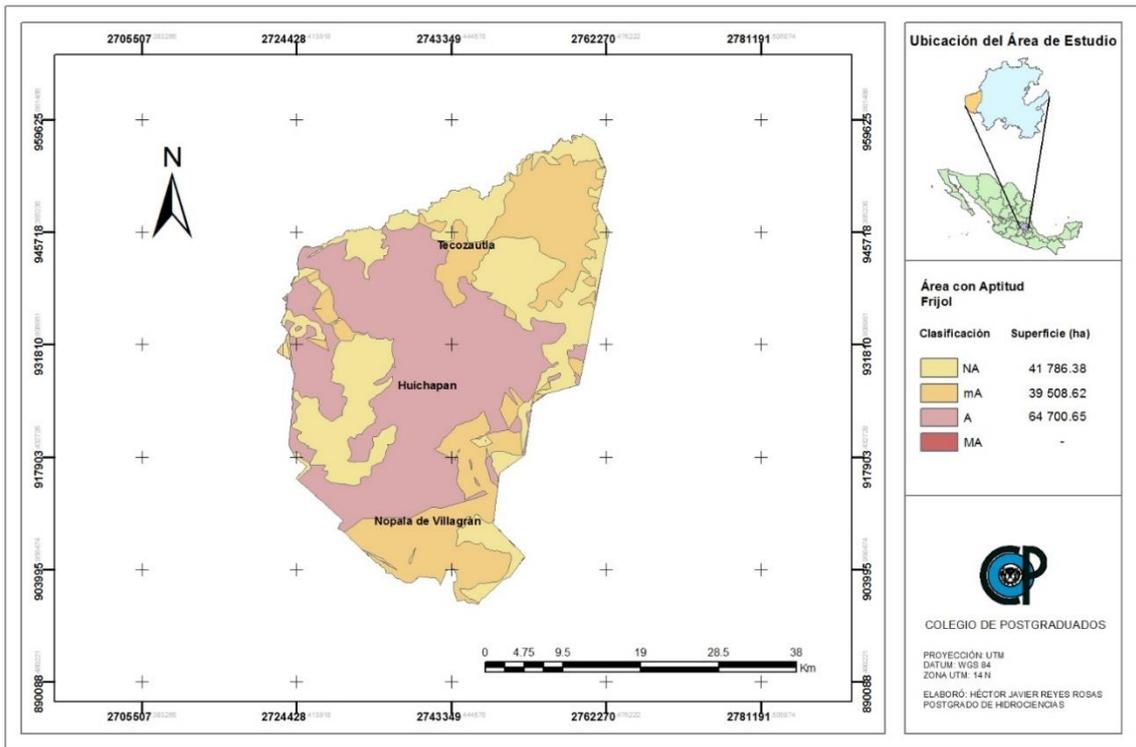


Figura 59. Zonificación para el cultivo de Frijol.

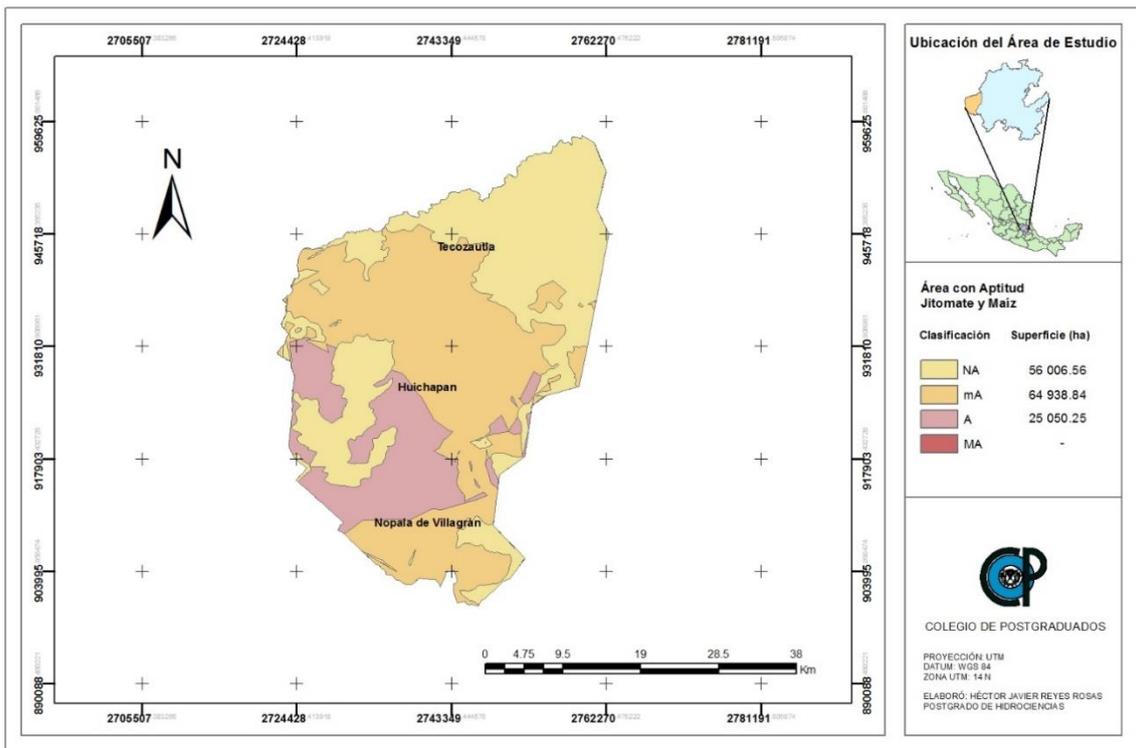


Figura 60. Zonificación para los cultivos de Jitomate y Maíz.

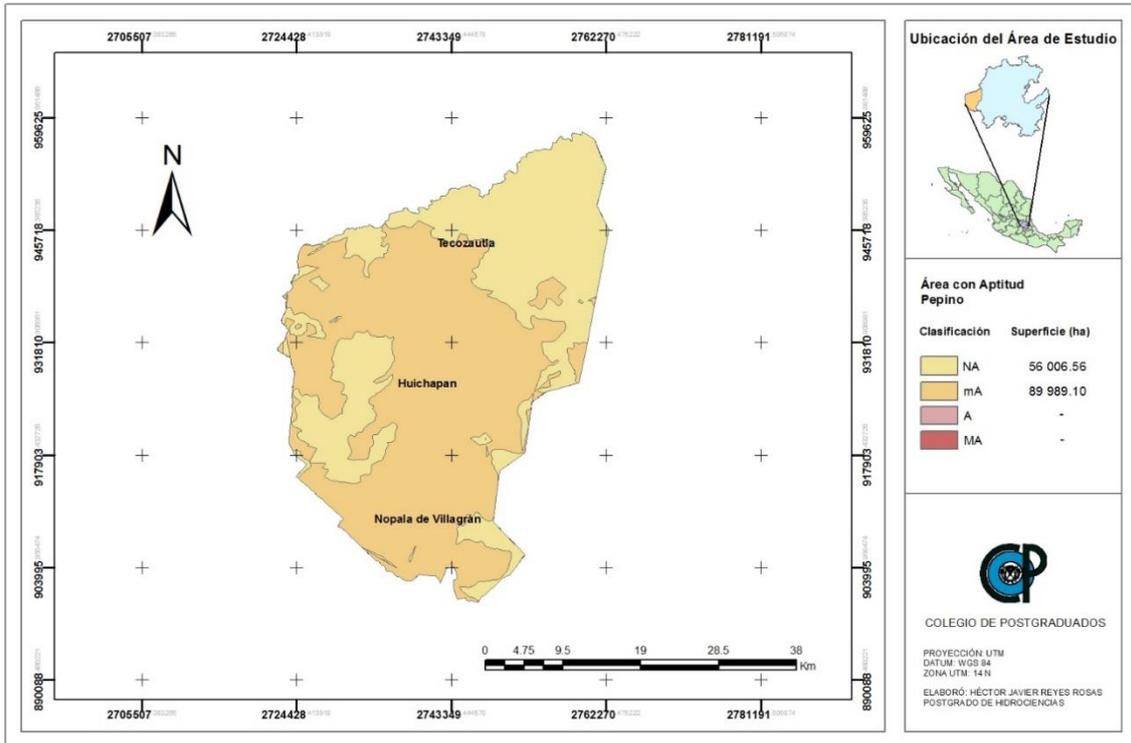


Figura 61. Zonificación para el cultivo de Pepino.

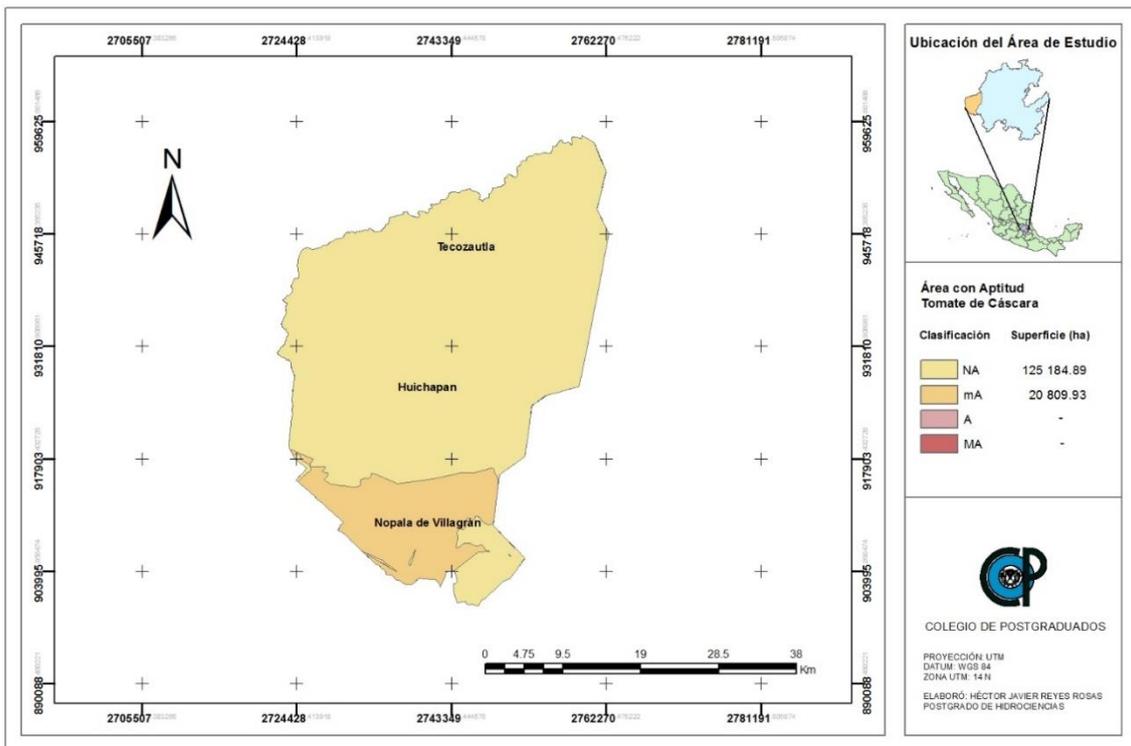


Figura 62. Zonificación para el cultivo de Tomate de cáscara.

Como se puede observar la mayoría de las figuras mostradas se aprecia que existe un déficit de agua para cubrir el requerimiento del mismo de cada cultivo, por lo cual es necesario completar con riego para que el desarrollo del cultivo en cada una de las zonas que se requiera sea completado como se requiera mensualmente de acuerdo al balance hídrico.

VI. CONCLUSIONES

Para el caso de la temperatura la mayoría de la zona de estudio para los cultivos de interés se encontraron niveles de aptitud entre Muy Apta y Apta, exceptuando el cultivo del tomate cascara ya que presenta un área en su mayoría marginalmente Apta y una proporción menor de área Apta.

Para el caso de precipitación, este factor si es limitante, ya que de acuerdo al balance hídrico la evapotranspiración es mayor que la precipitación, lo cual indica que existe un déficit hídrico en la zona de estudio, que nos indica que requiere complementación con riego en cada mes que se requiera.

Para las variables edáficas se encontró que existe una gran parte del territorio con textura media de un 78%, por lo cual los cultivos estudiados tendrían un desarrollo Apto y una proporción menor de textura fina que corresponde a No Apto. Sin embargo para la variable de profundidad se encuentra un área de 83% Apto, lo cual indica que esa área es apta para el desarrollo de los cultivos. En cuanto a la variable pendiente existe un área del 88% que se encuentra entre Muy Apto y Apto por lo tanto hay un área considerable para el buen desarrollo de los cultivos.

Se logró estimar la acumulación de grados días de desarrollo de acuerdo a los requerimientos térmicos de cada cultivo, mismos que servirán como base para estudios posteriores y de esta ubicar la acumulación de GDD para determinado cultivo en determinada zona.

Se estimó el periodo libre de heladas, los cuales la mayoría de las zonas superan los 6 meses libres de heladas, con un riesgo de 20%, lo cual de acuerdo a la duración de los ciclos de los cultivos, solo el cultivo de cebolla requiere más días para cumplir su ciclo, sin embargo este cultivo es tolerante a las heladas lo cual permite indicar que no hay daño significativo.

De acuerdo al algebra de mapas entre la parte térmica y edáfica, existe una superficie amplia con una aptitud Apta para la mayoría de los cultivos, para el caso del Ajo, Cebolla, Chile y Pepino existe un área de 77 144.08 ha, para la Calabacita una superficie de 66 801.54 ha, para los cultivos de Frijol, Jitomate y Maíz presenta una superficie de 68 696.94 ha, mientras que para el cultivo del Tomate de cascara solo se presentó una superficie de 12 899.59, ya que la mayoría de la superficie se encuentran entre mA y NA.

Conforme al algebra de mapas tomando en cuenta la parte térmica, edáfica y precipitación, son pocos los cultivos los que presentan una superficie con aptitud Apta; como es el caso de la calabacita con 62 805.67 ha, la cebolla con 77 144.08 ha, el chile con 33 491.31 ha, el frijol con 64 700.65 ha y para los cultivos de jitomate y maíz con 25 050.25 ha, mientras que para los cultivos de ajo, pepino y tomate de cascara solo existen áreas mA y NA. De acuerdo a esto se realizó un balance hídrico, lo cual presentó como resultado que la mayoría de los cultivos presentan un déficit de agua para poder completar a sus requerimientos hídricos, por lo cual se recomienda complementar con riego.

Con la generación de mapas de zonificación agroecológica fue posible diferenciar áreas de aptitud para las diferentes variables estudiadas para los cultivos de interés en la zona de estudio, esta clasificación permitió ubicar de una forma más precisa dichas áreas, además de que es una herramienta de mucha ayuda para mejorar los programas de producción agrícola.

VII. LITERATURA CITADA

Allen, G. R., S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Serie cuadernos técnicos, FAO, Roma, Italia, 2006.

Ayllón, T. 2013. Elementos de meteorología y climatología. 3ra edición. México: Trillas, 2013.

Becerra M., A. 2005. Escorrentía, erosión y conservación de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México.

Campos M, M., M. C. Romero y A. P. Sánchez. 2008. Propuesta de diseño de un sistema de captación y almacenamiento de agua lluvia para riego de cultivos en el canton el Progreso municipio de Torola, Morazan.Tesis Licenciatura. Departamento de Ingeniería y Aquitectura. Universidad de el Salvador. El Salvador.

De la Rosa, D., F. Mayol, E. Díaz-Pereira, M. Fernández, D. De la Rosa Jr. 2004. MicroLEIS DSS: Sistema de apoyo a la decisión sobre evaluación de tierras para la protección de suelos agrícolas. Con especial referencia a la región Mediterránea. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS). pp 39.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1997). Zonificación agroecológica. Guía general", Boletín de suelos, núm. 73, Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos, Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, Roma, Italia.

- FAO. 1994.** ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0, AGLS, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy [<http://www.ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropFindForm>: consultado en agosto de 2013].
- FAO. 2000.** Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de Tierras y Aguas de la FAO No. 8. FAO. Roma, Italia. 220 p.
- FAO-UNESCO. 1989.** Mapa Mundial de Suelos, Leyenda revisada, 60. FAO-Roma.
- García G, J. A. y A. F. Cebrián. 2006.** La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicación a la provincia de Albacete. Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. XII. 2006. Granada.
- García, E. 2004.** Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köpen, Serie Libros, núm. 6 Instituto de Geografía, UNAM. Mexico, D.F.
- García, E. M. 1980.** Apuntes de Climatología, Instituto de Geografía, UNAM. Mexico, D.F.
- Gliessman, R.S. 2000.** Agroecology: Ecological processes in sustainable agriculture Lewis Publishers. CRC Press LLC. USA. 357 p.
- González A, I., C. J. A. Ruíz, P. R. Martínez, M. K. Byerly, H. L. Mena y G. J. García. 2002.** Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el municipio de Jala, Nayarit. INIFAP. Folleto de Investigación Núm. 9. SARH. INIFAP. CESIX. Tepic, Nayarit.
- González C, G., R. E. Chavez, B. J. González, L. A. Dzul, C. I. Sánchez y T. M. Potisek. 2012.** Comparación de métodos para determinar la evapotranspiración

y oportunidad de riego en nogal pecanero. Terra Latinoamericana. ISSN 1870-9982. Vol. 30, Núm. 1, ene-mar, 2012, Pp. 29-38.

IMTA (2009). ERIC III 2.0: Extractor Rápido de Información Climatológica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [cd-rom].

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2005. Sistema de Descarga de Continuo de Elevaciones Mexicano. <http://www.inegi.gob.mx>.

Jiménez C. A., T. V. Vargas, C. W. E. Salinas, M. J. B. Aguirre y C. D. Rodríguez. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. ISSN 0188-4611, Núm. 53, pp 54-74.

Lasso B, L., G. Cruz E., R. Haro P. 2011. Zonificación agroecológica de tres cultivos estratégicos (Maíz, *Zea mays*; Arroz, *Oryza sativa*; Caña de azúcar, *Saccharum officinarum*) en catorce cantones de la cuenca baja del río Guayas, Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), Venezuela, 2011.

Márquez R, F. 1990. Zonificación agroecológica del maíz: (*Zea mays*) de temporal en el Estado de México. Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, Mexico

Martínez F, J., C. L. Tijerina, R. R. Arteaga, P. M. A. Vázquez y A. E. Becerril-Román. 2007. Determinación de zonas agroclimáticas para la producción de mango (*Mangifera indica* L “Manila”) en Veracruz, México. ISSN 0188-4611, Núm. 63, pp. 17-35.

Martínez S, M y R. J. Prieto. 2011. Determinación de áreas potenciales para el establecimiento de Plantaciones forestales comerciales en la región norte de México. SAGARPA. INIFAP. CERNIC. CEVG. Folleto técnico núm. 47. pp 36.

- Medina G, G. C, J. A. Ruíz, P. G. Díaz y A. V. Serrano. 2008.** Probabilidad de ocurrencia de Heladas en el estado de Zacatecas. INIFAP. Libro técnico No. 8. Campo Experimental Zacatecas. Zacatecas.
- Meza S, R. y R. J. Martínez. 2004.** Características ambientales y áreas potenciales para cultivos en el municipio de La Paz, B.C.S. INIFAP. Publicación Técnica Núm. 2. La Paz, B.C.S., México.
- Morales S. L., M. F. Canessa, C. Mattar, R. Orrego y F. Matus. 2006.** Caracterización y zonificación edáfica y climática de la región de Coquimbo, Chile. R. C. Suelo Nutr. Veg. 6 (3) 2006(52-74).
- Neild R. E., and J. E. Newman. 1987.** Growing season characteristics and requirements in the corn belt. *In*: National Corn Handbook. Project leader R. Nielsen. Purdue University. West Lafayette, Indiana. USA. 16 p.
- NMX-AA-166/1-SCFI-2013. 2013.** Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas - parte 1: especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales. Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Economía. 16/43
- Ojeda B, W., I. E. Sifuentes y W. H. Unland. 2006.** Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. Revista Agrociencia. ISSN 1405-3195, México, Vol. 40 Núm. 001, pp13-25.
- Ojeda B, W., E. Sifuentes, D. C. Slack, and M. Carrillo. 2004.** Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. Irrigation and Drainage. 53: 251-261.

- Ortíz S, C.A. 1981.** Evaluación de la aptitud de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo en condiciones de temporal. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Ortíz V, B y S. C. Ortíz. 1990.** Edafología. 7ma Edición. Universidad Autónoma Chapingo. México
- Osses R, F. 2012.** Determinación de zonas idóneas para el establecimiento de plantaciones vitivinícolas en la comuna de Hualañé. Nadir: Rev. Electron. Geogr. Austral. Año 4, Núm. 1, enero-julio, pp 18.
- Pereira, A.R. 1982.** Crop planning for different environments. Agric. Meteorol., 1-77.
- Pineda S, L. D. y H. J. Suárez. 2014.** Elaboración de un SIG orientado a la zonificación agroecológica de los cultivos. Revista INGENIERÍA AGRÍCOLA, ISSN-2326-1545, RNPS-0622, Vol. 4, No. 3 (julio-agosto-septiembre), pp. 28-32, 2014.
- Rivera H, B., N. L. Aceves, L. J. Juárez, L. D. Palma, M. R. González y J. V. González. 2012.** Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihotesculenta* Crantz) en el estado de Tabasco. Avances en Investigación Agropecuaria. 16(1): 29-47. Issn 0188789-0.
- Romo G, J.R. 1985.** Zonas con potencial agroclimático para la producción de cinco oleaginosas bajo temporal en la República Mexicana. Tesis Maestria en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo México.
- Ruiz C, J. A., G. G. Medina, A. I. González, T. C. Ortiz, L- H. Flores, P. R. Martínez y M. K. Bierly. 1999.** Requerimientos Agroecológicos de Cultivos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Campo Experimental Centro de

Jalisco. Libro Técnico Núm. 3. Conexión Gráfica, Guadalajara, Jalisco, México.
324 p.

SARH. 1982. Ciclos de cultivo: diagramas de las principales especies vegetales con las cuales se efectúan investigaciones agrícolas en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Gobierno Federal, México. 86 p.

Snyder L. R, J. P. de Melo-Abreu y S. Matulich. 2010. Protección contra las heladas: fundamentos práctica y economía. Volumen I y II. Roma FAO 2010.

Snyder L., R. 2005. DegDay. University of California. Department of land, Air and Water Resources. Atmospheric Science. Davis, California, U.S.A.

Snyder L., R., y De Melo-Abreu, J. P, 2003. FriskNH. University of California. Department of land, Air and Water Resources. Atmospheric Science. Davis, California, U.S.A.

Tijerina Ch., L. y S. C. A. Ortíz. 1990. Manual de la metodología para evaluar la aptitud de las tierras para la producción de cultivos básicos en condiciones de temporal. Programa Agrometeorología. Colegio De Postgraduados, Montecillo, México.

Torres R., E. 2006. Agrometeorología. 2da Edición. Trillas: UAAAN. México.

Villalpando I., J. F. y C, J. A. Ruiz. 1993. Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Editorial Limusa, S. A. de C. V. México, D. F. 133 p

Zúñiga L., I. y E. Crespo. 2010. Meteorología y Climatología. Editorial UNED. Madrid, España.

VIII. ANEXOS

ANEXO I. Descripción de los Cultivos

Descripción de las especies (Tomado de Ruiz *et al.*, 1999)

CALABACITA *Cucurbita pepo* L.

La calabacita pertenece a la familia *Cucurbitaceae*, su origen radica en muchos sitios arqueológicos de Norteamérica, principalmente México, se adapta en las regiones templadas, tropicales de altura y subtropicales. Su ciclo vegetativo oscila entre los 40-100 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

Fotoperiodo: Se considera una planta de día neutro.

Altitud: Se puede encontrar en regiones tropicales a los 1200 msnm y en regiones templadas desde el nivel del mar en adelante.

Precipitación: Normalmente se cultiva bajo condiciones de riego y es bastante exigente de humedad. Requiere que se acumulen de 300 a 2800 mm durante el ciclo, con un óptimo alrededor de 1500 mm.

Humedad ambiental: Es un cultivo de humedad ambiental media.

Temperatura: El rango térmico para crecimiento de esta especie es 7-30°C, con un óptimo alrededor de los 17°C. La temperatura mínima y máxima para germinación es 10 a 40°C, respectivamente, con una óptima de 20 a 30°C; se reduce a cero a 8°C y el punto de congelación se alcanza a -1°C.

- Luz:** Prefiere ambientes soleados, pero también puede desarrollar en condiciones de menor luminosidad.
- Textura de suelo:** Prefiere suelos de textura media a pesada, como suelos francos, franco-arenosos, franco-limosos, franco-arcillo-limosos y franco-arcillosos
- Profundidad del suelo:** Requiere de suelos de mediana profundidad, con un mínimo de 50 cm de suelo.
- Salinidad:** Es una especie con de ligera tolerancia a la salinidad.
- pH:** Se desarrolla en un pH que varía desde 4.3 a 8.3.
- Drenaje:** Requiere de un buen drenaje.

Cebolla *Allium cepa* L.

La cebolla pertenece a la familia *Liliaceae*, su origen radica Paquistán occidental, se adapta en las regiones templadas no extremosas. Su ciclo vegetativo oscila entre los 130-180 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

- Fotoperiodo:** Es una especie de día neutro, pero hay cultivares que se dan mejor en días cortos y otros que se dan mejor en días largos.
- Altitud:** Se puede encontrar en regiones que van desde 0-2000 msnm.
- Precipitación:** Principalmente se cultiva bajo condiciones de riego. Requiere de 350-550 mm durante el ciclo del cultivo. Es tolerante a la sequía

pero no debería faltar agua en las etapas de germinación, la formación de la raíz y desarrollo del bulbo.

Humedad ambiental: Requiere una atmosfera seca, aunque para el crecimiento del bulbo requiere una humedad relativa inferior al 70%.

Temperatura: Rango 10-25°C, con un óptimo entre 15 y 20°C. Es tolerante a las heladas y para la iniciación floral necesita temperaturas inferiores a 14-16°C. En general se prefieren temperaturas más bajas en la fase inicial del cultivo y más altas hacia la maduración. Al inicio de la formación de bulbos se requieren temperaturas de entre 15.6 y 25°C.

Luz: Exige mucha insolación.

Textura de suelo: Prefiere suelos de textura media, migajones arenosos, como franco-arenosos y franco-arcillo-limosos.

Profundidad del suelo: Requiere de suelos profundos, siendo suficientes 40-60 cm de suelo.

Salinidad: Es una especie con de moderada tolerancia a la salinidad. Se considera un cultivo sensible a la salinidad.

pH: No tolera acidez y se desarrolla en un pH que varía desde 6.0 a 7.5.

Drenaje: Requiere de un buen drenaje.

CHILE *Capsicum frutescens* L.

El cultivo del chile pertenece a la familia *Solanaceae*, su origen radica en México, se adapta en las regiones templada, subtropicales y tropicales; zonas cálidas, semicalidas, semifrías; áreas semiáridas, áridas, subhúmedas y húmedas. Su ciclo vegetativo oscila entre los 10-150 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

Fotoperiodo: Es una planta de día corto, aunque existen especies que son indiferentes a la duración del día.

Altitud: Se puede encontrar en regiones que van desde 0-2000 msnm.

Precipitación: Se desarrolla en un rango que va de 300-400 mm, con un nivel óptimo alrededor de los 220 mm.

Temperatura: Rango térmico para el desarrollo es de 7-29°C, con un óptimo entre 18°C.

Luz: Prefiere condiciones de iluminación de intensa a moderada.

Textura de suelo: Prefiere suelos de textura ligera a media.

Profundidad del suelo: Requiere de suelos de profundidad moderada.

Salinidad: Es moderadamente tolerante a la salinidad.

pH: Se desarrolla adecuadamente en un pH que va de 4.3 a 8.3 siendo el óptimo alrededor de 6.3.

Drenaje: Requiere de un buen drenaje. Para evitar encharcamientos.

Frijol *Phaseolus vulgaris* L.

El cultivo del Frijol pertenece a la familia *Fabaceae* (*Leguminosae*), su origen radica en América, siendo el principal centro de diversificación primaria el área de México y Guatemala, se adapta en las regiones tropicales y subtropicales semiáridas frescas, así como zonas subhúmedas. Su ciclo vegetativo oscila entre los 90-120 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

Fotoperiodo: Existen cultivares indiferentes a la duración del día, pero hay otros que se comportan como plantas de día corto.

Altitud: Se puede encontrar en regiones que van desde 0-2400 msnm.

Precipitación: Requiere de 350-400 mm durante el ciclo del cultivo y prospera en regiones con precipitación anual entre 600 y 2000 mm.

Humedad ambiental: Requiere una atmosfera moderadamente húmeda y le afecta una atmosfera excesivamente seca y cálida.

Temperatura: El rango térmico para esta especie es de 10-30°C, con un óptimo entre 16 y 24°C. La temperatura óptima para germinación está entre 16 y 29°C. Altas temperaturas inducen la abscisión de órganos reproductivos, reduciendo el rendimiento.

Luz: Prefiere días despejados.

Textura de suelo: Prefiere suelos de texturas ligeras, como franco-arenosos y franco-arcillo.

Profundidad del suelo: Requiere de suelos con un mínimo de profundidad de 60 cm de suelo.

Salinidad: Es una especie sensible a la salinidad. Requiere suelos libres de sales.

pH: Se desarrolla en un rango de 5.3 a 7.5, con un óptimo de 5,5 a 6.5, no tolera la alcalinidad.

Drenaje: Requiere suelos aireados y con buen drenaje.

Jitomate *Lycopersicum esculentum* Mill.

El cultivo del jitomate pertenece a la familia *Solanaceae*, su origen radica en América del Sur, en la región andina, se adapta en las regiones tropicales, subtropicales semiáridas y templadas. Su ciclo vegetativo oscila entre los 90-140 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

Fotoperiodo: Es una planta de día neutro.

Altitud: Se puede encontrar en regiones que van desde 0-1800 msnm.

Precipitación: Requiere de 400 a 600 mm durante el ciclo vegetativo del cultivo.

Humedad ambiental: Requiere una humedad relativa que va desde 50% a 60%.

Temperatura: El rango térmico para esta especie es de 15-29°C, con un óptimo entre 10 y 35°C. La temperatura óptima es de 26 a 32°C para germinación de la semilla, 25-26°C para crecimiento de la plántula, 22 – 27°C para la germinación del polen y crecimiento del tubo polínico, 18 – 20°C para formación de fruto y 24 a 28°C para la maduración de fruto.

Luz: Requiere de alta intensidad luminosa. La escases de luz produce en las plantas debilitamiento, las cuales se tornan más susceptibles a enfermedades.

Textura de suelo: Prefiere los suelos óptimos limos ligeros, aunque se desarrolla bien en los suelos franco-arcillosos.

Profundidad del suelo: Requiere de suelos profundos generalmente mayores de 1 m.

Salinidad: Es una especie tolerante a la salinidad.

pH: Se desarrolla en un rango de 5.5 a 7., con un óptimo de 6.2.

Drenaje: Requiere suelos con buen drenaje.

Maíz *Zea mays* L.

El cultivo del maíz pertenece a la familia *Poaceae* (*Gramineae*), su origen radica en México y América Central, se adapta en las regiones tropicales, subtropicales semiáridas y templadas. Su ciclo vegetativo oscila entre los 100-180 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

Fotoperiodo: Es una planta de día corto, aunque hay algunas especies que se comportan indiferentes a la duración del día.

Altitud: Se puede encontrar en regiones que van desde 0-3300 msnm.

Precipitación: Requiere de 500 a 800 mm durante el ciclo vegetativo del cultivo dependiendo de la variedad y el clima.

- Humedad ambiental:** Requiere una atmosfera moderadamente húmeda.
- Temperatura:** La mayoría de los procesos de crecimiento y desarrollo en maíz están fuertemente influidos por temperaturas entre 10 y 28°C.
- Luz:** Requiere de alta intensidad luminosa, por ello no son aptas las regiones con nubosidad alta.
- Textura de suelo:** Prefiere los suelos de textura ligera a media como franco-limosos, franco-arcillosos y franco-arcillosos-limosos
- Profundidad del suelo:** Requiere de suelos profundos generalmente entre 1 a 1.7 m.
- Salinidad:** Es una especie tolerante a la salinidad, siempre que ésta no sea mayor que 7 mmhos/cm.
- pH:** Se desarrolla en un rango de 5 a 8., con un óptimo de 6 a 7.
- Drenaje:** Requiere suelos con buen drenaje, ya que no tolera encarcamientos.

Pepino *Cucumis sativus* L.

El cultivo del pepino pertenece a la familia *Cucurbitaceae*, su origen radica al sur de Asia, se adapta en las regiones subtropicales y templadas. Su ciclo vegetativo oscila entre los 80-90 días, de acuerdo a su tipo fotosintético pertenece a un C₃.

- Fotoperiodo:** Es una planta de día neutro.
- Altitud:** Se puede encontrar en regiones que van desde 0-1600 msnm.
- Precipitación:** Requiere de 300 mm, se cultiva preferentemente bajo riego.

- Humedad ambiental:** Requiere de condiciones intermedias de humedad ambiental.
- Temperatura:** La mayoría de los procesos de crecimiento y desarrollo están fuertemente influidos por temperaturas entre 10 y 28°C.
- Luz:** Requiere de alta intensidad luminosa, por ello no son aptas las regiones con nubosidad alta.
- Textura de suelo:** Prefiere los suelos de textura ligera a media como franco-limosos, franco-arcillosos y franco-arcillosos-limosos.
- Profundidad del suelo:** Requiere de suelos profundos generalmente entre 1 a 1.7 m.
- Salinidad:** Es una especie tolerante a la salinidad, siempre que ésta no sea mayor que 7 mmhos/cm.
- pH:** Se desarrolla en un rango de 5 a 8, con un óptimo de 6 a 7.
- Drenaje:** Requiere suelos con buen drenaje, ya que no tolera encharcamientos.

Tomate de Cascara *Physalis ixocarpa* L.

El origen del género *Lycopersicon* se localiza en la región andina que se extiende desde el sur de Colombia al norte de Chile, pero parece que fue en México donde se domesticó, quizá porque crecería como mala hierba entre los huertos. Su ciclo vegetativo oscila entre los 90-100 días.

Altitud: Se puede encontrar en regiones que van desde 0-2000 msnm.

Precipitación: Requiere de 700 a 1000 mm.

- Humedad ambiental:** La humedad relativa óptima oscila entre un 60% y un 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores.
- Temperatura:** La mayoría de los procesos de crecimiento y desarrollo están fuertemente influidos por temperaturas entre 20 y 30 °C. Aunque su temperatura va de 19 a 25 °C.
- Luz:** Valores reducidos de luminosidad pueden incidir de forma negativa sobre los procesos de la floración y fecundación así como el desarrollo vegetativo de la planta.
- Textura de suelo:** Prefiere los suelos de textura ligera a media como franco-limosos, silíceo-arcillosos y ricos en materia orgánica.
- Profundidad del suelo:** Requiere de suelos profundos generalmente entre 1 a 1.7 m.
- Salinidad:** Es una especie tolerante a la salinidad, siempre que ésta no sea mayor que 7 mmhos/cm.
- pH:** De ligeramente ácidos hasta ligeramente alcalinos.
- Drenaje:** Requiere suelos con buen drenaje, ya que no tolera encharcamientos.

ANEXO II. Requerimientos y déficits para los cultivos de interés

Anexo 2.1. Requerimientos y déficits para los cultivos de interés en la zona norte (expresados en mm)

Mes	Ajo			Calabacita			Cebolla			Chile			Frijol			Jitomate			Maíz			Pepino			Tomate de cáscara		
	ETP	Pp	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)
Ene	118.0	4.2	-78.4																								
Feb	122.9	5.4																									
Mar	158.1	3.2																									
Abr	162.5	10.3		0.5	81.3	-71.0	1.0	162.5	-152.2	0.7	113.8	-103.5				0.6	97.5	-87.2									
May	174.6	22.4		0.7	129.2	-106.8	1.0	174.6	-152.2	0.9	161.5	-139.1	0.7	122.2	-99.8	0.9	152.7	-130.4	0.3	52.4	-30.0	0.6	104.7	-82.4	0.6	104.7	-82.4
Jun	156.8	60.6		1.0	153.7	-93.1				1.2	180.3	-119.8	0.9	145.0	-84.5	1.2	180.3	-119.8	0.8	117.6	-57.0	0.8	125.4	-64.9	0.9	137.2	-76.6
Jul	153.6	96.7		0.9	132.8	-36.2				1.2	176.6	-79.9	1.2	176.6	-79.9	1.2	176.6	-79.9	1.2	184.3	-87.6	1.0	153.6	-56.9	1.2	176.6	-79.9
Ago	152.1	82.5	-24.0	0.8	114.1	-31.6				1.0	148.3	-65.8	1.2	174.9	-92.4	1.0	148.3	-65.8	1.2	182.6	-100.0	0.9	133.1	-50.6	1.0	148.3	-65.8
Sep	128.6	70.8	-38.6							0.8	102.9	-32.1	0.8	96.5	-25.7	0.8	102.9	-32.1	0.8	99.7	-28.9	0.8	96.5	-25.7	0.8	102.9	-32.1
Oct	117.8	36.1	-81.7				0.7	82.5	-46.4				0.4	41.2	-5.1				0.4	41.2	-5.1						
Nov	107.2	9.2	-98.0				0.9	91.2	-81.9																		
Dic	108.4	1.1	-91.1				1.0	108.4	-107.4																		

Abreviaturas: ETP: Evapotranspiración; Pp: Precipitación; Kc: Coeficiente del cultivo; ETc: Evapotranspiración del cultivo; D: Déficit hídrico.

Anexo 2.2. Requerimientos y déficits para los cultivos de interés en la zona centro (expresados en mm)

Mes	Ajo			Calabacita			Cebolla			Chile			Frijol			Jitomate			Maíz			Pepino			Tomate de cáscara		
	ETP	Pp	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)	Kc	ETc	D=(Pp-ETc)
Ene	87.8	7.7	-53.8	0.7	61.5		1.0	87.8	-80.2																		
Feb	93.5	4.4					1.0	93.5	-89.1																		
Mar	137.4	5.3					1.0	137.4	-132.1																		
Abr	142.2	17.5		0.5	71.1	-53.6	1.0	142.2	-124.7	0.7	99.6	-82.0			0.6	85.3	-67.8										
May	154.0	33.8		0.7	114.0	-80.2	1.0	154.0	-120.3	0.9	142.5	-108.7	0.7	107.8	-74.1	0.9	134.8	-101.0	0.3	46.2	-12.4	0.6	92.4	-58.7	0.6	92.4	-58.7
Jun	132.6	75.8		1.0	130.0	-54.2				1.2	152.5	-76.7	0.9	122.7	-46.9	1.2	152.5	-76.7	0.8	99.5	-23.7	0.8	106.1	-30.3	0.9	116.0	-40.3
Jul	127.8	90.1		0.9	110.5	-20.4				1.2	147.0	-56.8	1.2	147.0	-56.8	1.2	147.0	-56.8	1.2	153.3	-63.2	1.0	127.8	-37.6	1.2	147.0	-56.8
Ago	124.5	76.3	-10.9	0.8	93.4	-17.1				1.0	121.4	-45.1	1.2	143.2	-66.9	1.0	121.4	-45.1	1.2	149.4	-73.2	0.9	108.9	-32.7	1.0	121.4	-45.1
Sep	97.8	94.4	0	0.9	83.1					0.8	78.2	0	0.8	73.3	0	0.8	78.2	0	0.8	75.8	0	0.8	73.3	0	0.8	78.2	0
Oct	88.7	47.9	-40.8	1.0	88.7		0.7	62.1	-14.2				0.4	31.0	0			0.4	31.0	0							
Nov	84.5	13.0	-71.5	1.0	84.5		0.9	71.8	-58.8																		
Dic	80.1	0.6	-67.5	0.9	68.1		1.0	80.1	-79.5																		

Abreviaturas: ETP: Evapotranspiración; Pp: Precipitación; Kc: Coeficiente del cultivo; ETc: Evapotranspiración del cultivo; D: Déficit hídrico.

Anexo 2.3. Requerimientos y déficits para los cultivos de interés en la zona sur (expresados en mm)

Mes	Ajo			Calabacita			Cebolla			Chile			Frijol			Jitomate			Maíz			Pepino			Tomate de cáscara					
	ETP	Pp	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)	Kc	ETc	D= (Pp-ETc)			
Ene	101.6	5.6	-65.5	0.7	71.1				1.0	101.6	-96.0																			
Feb	115.7	3.5							1.0	115.7	-112.1																			
Mar	157.0	8.9							1.0	157.0	-148.1																			
Abr	164.6	21.2					0.5	82.3	-61.1	1.0	164.6	-143.4	0.7	115.2	-94.0		0.6	98.8	-77.5											
May	163.9	44.8					0.7	121.3	-76.5	1.0	163.9	-119.1	0.9	151.6	-106.8	0.7	114.7	-69.9	0.9	143.4	-98.6	0.3	49.2	-4.4	0.6	98.3	-53.5	0.6	98.3	-53.5
Jun	130.1	115.5					1.0	127.5	-12.0				1.2	149.6	-34.2	0.9	120.4	-4.9	1.2	149.6	-34.2	0.8	97.6	0	0.8	104.1	0	0.9	113.9	0
Jul	118.1	136.7					0.9	102.1	0				1.2	135.8	0	1.2	135.8	0	1.2	135.8	0	1.2	141.7	-4.9	1.0	118.1	0	1.2	135.8	0
Ago	115.5	139.7	0	0.7	80.9	0	0.8	86.6	0				1.0	112.6	0	1.2	132.8	0	1.0	112.6	0	1.2	138.6	0	0.9	101.1	0	1.0	112.6	0
Sep	99.6	157.1	0	0.9	84.7	0							0.8	79.7	0	0.8	74.7	0	0.8	79.7	0	0.8	77.2	0	0.8	74.7	0	0.8	79.7	0
Oct	91.3	81.2	-10.1	1.0	91.3				0.7	63.9	0				0.4	31.9	0				0.4	31.9	0							
Nov	88.5	13.1	-75.4	1.0	88.5				0.9	75.2	-62.1																			
Dic	94.9	2.0	-78.7	0.9	80.7				1.0	94.9	-93.0																			

Abreviaturas: ETP: Evapotranspiración; Pp: Precipitación; Kc: Coeficiente del cultivo; ETc: Evapotranspiración del cultivo; D: Déficit hídrico.