



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

**APTITUD AGROCLIMÁTICA, CAMBIO CLIMÁTICO Y VULNERABILIDAD
SOCIOAMBIENTAL DE LOS PRODUCTORES DE AGUACATE EN PUEBLA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
EDUARDO PÉREZ SOSA

DIRECTORA DE TESIS
DRA. GUADALUPE REBECA GRANADOS RAMÍREZ
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX, octubre 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*Cada objetivo que alcanzo es para mi familia, y este no es la
excepción...dedico este trabajo a ellos, cuyo cariño es
inecondicional...los amo profundamente.*

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, que me ha formado y me ha permitido continuar con mi desarrollo académico y profesional.

A mi directora de tesis la Dra. Rebeca Granados que me ha apoyado e impulsado desde antes de comenzar con este trabajo y durante todo este periodo, muchas gracias por todo.

También expreso mi gratitud a los integrantes del sínodo que dedicaron su tiempo y esfuerzo en revisar y brindar sus valiosos comentarios que fortalecieron esta investigación: a la Dra. María Luz Hernández Navarro de la Universidad de Zaragoza, Dra. Raquel Salvador Esteban del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, a la Dra. María Engracia Hernández Cerda y el Dr. Arturo García Romero del Instituto de Geografía y al Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez de la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme la beca de tiempo completo durante el programa de posgrado y posteriormente otorgarme el apoyo para realizar una estancia de investigación fuera del país.

A la Dra. María Luz Hernández Navarro y las autoridades de la Universidad de Zaragoza, España que me aceptaron para desarrollar mi estancia de investigación. Sin duda fue una experiencia enriquecedora no solo en el ámbito académico, también en el personal; aprendí mucho de ustedes.

A los especialistas en aguacate, tanto investigadores como productores que aportaron sus conocimientos para el desarrollo de la investigación.

A mis padres Teo y Guadalupe y mis dos hermanas Angélica y Cynthia, muchas gracias por su apoyo y cariño: ustedes son mi motor.

A las personas que hicieron sentirme como en casa durante mi estancia en España y con las que compartí muchos buenos momentos: Ricardo, Alberto, Rodrigo, Maryna, Celia, María José y Jacky.

A mis entrañables amigos Saddam, Jonathan, Ernesto, Kevin y Jojosé por el apoyo y todas esas experiencias que compartimos durante este tiempo. Sin duda son una parte fundamental.

Por último, a todas esas personas que han estado en este proceso y contribuyeron de alguna manera con la culminación de este objetivo.

A través de estas líneas les agradezco profundamente.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Agroclimatología del aguacate, cambio climático, riesgo y vulnerabilidad	6
1.1 La Agroclimatología	6
1.2 Cambio climático y sus causas	9
1.3 Escenarios y modelos	14
1.4 Impactos en la agricultura	16
1.5 Riesgo y vulnerabilidad al cambio climático	20
1.6 El aguacate.....	25
1.6.1 Origen y domesticación de la planta.....	25
1.6.2 Características del aguacate	27
1.6.3 Fenología del aguacate	29
1.6.4 Condiciones físicas favorables para el cultivo	31
1.6.5 Relación de la radiación solar con la planta	32
1.6.6 Influencia de la temperatura en la fenología	33
1.6.7 Disponibilidad de agua y aguacate	35
Capítulo 2. Zonificación agroclimática actual y bajo escenarios de cambio climático.....	37
2.1 Área de estudio.....	37
2.1.1. Medio físico	37
2.1.2 Área productora de aguacate en Puebla	42
2.2 Obtención de datos.....	44
2.3 Toma de decisiones multicriterio y <i>Analytic Hierarchy Process</i>	45
2.4 Zonificación agroclimática del aguacate en Puebla.....	48
2.4.1 Zonificación actual	51
2.5 Limitantes para las plantaciones	55
2.5.1. Uso del suelo prioritario	55
2.5.2 Heladas tardías	61
2.6 Zonificación agroclimática bajo escenarios de cambio climático.....	67
2.6.1 Horizonte 2015-2039	68
2.6.2 Horizonte 2045-2069	73
2.7 Municipios productores de aguacate ante el cambio climático	77
Capítulo 3. Vulnerabilidad socioambiental ante el cambio climático en los municipios productores de aguacate en Puebla	83

3.1 Vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático	83
3.2 Selección de variables e indicadores	88
3.2.1 Índice Costo de producción	89
3.2.2 Índice de Ingresos y dependientes	90
3.2.3 Índice de Limitantes ambientales para la agricultura	91
3.2.4 Índice de Organización y financiamiento	91
3.3 Cálculo del índice	92
3.4 Descripción de las dimensiones que componen al índice de vulnerabilidad socioambiental	95
3.4.1 Sensibilidad	95
3.4.2 Exposición	98
3.4.3 Capacidad de adaptación	99
3.5 Vulnerabilidad socioambiental en los municipios productores de aguacate en Puebla	103
Discusión	110
Conclusiones	117
Bibliografía	118
Anexo 1. Superficies y porcentajes de aptitud por municipio	133
Anexo 2. Superficies potenciales sostenibles por municipio	144
Anexo 3. Probabilidad de heladas tardías en Puebla	149
Anexo 4. Número y frecuencia de heladas tardías en Puebla	151
Anexo 5. Riesgo de heladas tardías en el aguacate	155
Anexo 6. Descripción de los valores de cambio de aptitud bajo tres modelos (2015-2039)	159
Anexo 7. Descripción de los valores de cambio de aptitud bajo tres modelos (2045-2069)	161
Anexo 8. Descripción de los componentes de la vulnerabilidad socioambiental de los municipios productores de aguacate en Puebla	163

Índice de tablas y figuras

Tabla 1. Comparación entre las tres razas de aguacate	28
Tabla 2. Resistencia al frío del árbol de aguacate	34
Tabla 3. Resistencia al frío del aguacate por variedad	34
Tabla 4. Necesidades hídricas del aguacate en tres tipos de climas	35
Tabla 5. Provincias y subprovincias fisiográficas de Puebla	38
Tabla 6. Correspondencia de expresiones verbales	48
Tabla 7. Ponderación de variables	48
Tabla 8. Valores mínimos y máximos	49
Tabla 9. Parámetros que condicionan la aptitud.....	49
Tabla 10. Valores de Xmax y amplitud para cada variable.....	51
Tabla 11. Superficie total de aptitud en Puebla	51
Tabla 12. Porcentaje de aptitud para los municipios del cuadrante 1	54
Tabla 13. Estaciones seleccionadas para cálculo de heladas tardías	63
Tabla 14. Condiciones y valores de los resultados de cambio de aptitud por cambio climático	77
Tabla 15. Nuevas condiciones según combinaciones posibles.....	78
Tabla 16. Variables empleadas para el cálculo del índice de vulnerabilidad	88

Figura 1. Cuatro problemas del riesgo..	20
Figura 2. Componentes de la vulnerabilidad.....	22
Figura 3. Provincias fisiográficas y tipos de climas en Puebla..	39
Figura 4. Tipos de suelos y vegetación en Puebla.....	41
Figura 5. Superficie sembrada y rendimiento promedio por municipio.....	42
Figura 6. Distribución de municipios en ejes X, Y..	43
Figura 7. Municipios productores de aguacate y cuadrantes.....	44
Figura 8. Modelo de decisión simplificado..	47
Figura 9. Funciones de valor.	50
Figura 10. Aptitud agroclimática para el aguacate en el estado de Puebla.	52
Figura 11. Porcentaje de aptitud por municipio..	53
Figura 12. Categoría óptima potencial sostenible para el aguacate en Puebla.	57
Figura 13. Categoría apta potencial sostenible para el aguacate en Puebla.	58
Figura 14. Categoría media potencial sostenible para el aguacate en Puebla.	58
Figura 15. Riesgo de helada para el aguacate en Guadalupe Victoria..	66
Figura 16. Riesgo de helada para el aguacate en Ajalpan..	66
Figura 17. Comportamiento del cambio de categorías de aptitud bajo escenarios de cambio climático.....	68
Figura 18. Distribución de las condiciones óptimas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039).....	69
Figura 19. Distribución de las condiciones aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039).....	70
Figura 20. Distribución de las condiciones medias para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039).....	71

Figura 21. Distribución de las condiciones poco aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039).....	72
Figura 22. Distribución de las condiciones no aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039).....	72
Figura 23. Distribución de las condiciones óptimas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069).....	73
Figura 24. Distribución de las condiciones aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069).....	74
Figura 25. Distribución de las condiciones medias para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069).....	75
Figura 26. Distribución de las condiciones poco aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069).....	76
Figura 27. Distribución de las condiciones no aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069).....	76
Figura 28. Valores de cambio de aptitud bajo para el horizonte 2015-2039.....	80
Figura 29. Valores de cambio de aptitud bajo para el horizonte 2045-2069.....	81
Figura 30. Coincidencias y diferencias entre valores de cambio de aptitud.....	82
Figura 31. Exportaciones de aguacate por continente, 2019..	85
Figura 32. Modelo conceptual de la vulnerabilidad socioambiental de los productores de aguacate en Puebla.....	87
Figura 33. Diagrama de cajas de la dimensión “Sensibilidad”.....	96
Figura 34. Histograma de la dimensión “Sensibilidad”.	96
Figura 35. Grado de sensibilidad de los municipios productores de aguacate.	97
Figura 36. Diagrama de cajas de la dimensión “Exposición”.	98
Figura 37. Histograma de la dimensión “Sensibilidad”.	99
Figura 38. Grado de exposición de los municipios productores de aguacate.....	100
Figura 39. Diagrama de cajas de la dimensión “Capacidad de adaptación”.	101
Figura 40. Histograma de la dimensión “Capacidad de adaptación”.	101
Figura 41. Capacidad de adaptación en los municipios productores de aguacate.	102
Figura 42. Diagrama de caja del índice de vulnerabilidad y sus componentes.	104
Figura 43. Histograma del índice de vulnerabilidad socioambiental.	104
Figura 44. Grado de vulnerabilidad socioambiental en los municipios productores de aguacate.	105

Introducción

El término “oro verde” es un adjetivo acertado para describir a uno de los productos agrícolas mejor posicionados en el mundo. El aguacate, cuyo origen y domesticación tuvieron lugar en el territorio de lo que hoy es México, representa en la actualidad el fruto con ganancias económicas sobresalientes para el país. Tan solo en los años 2016 y 2018, el valor económico de las exportaciones superó a las del petróleo (El Universal, 2017; La Jornada, 2020), y en 2019, según los datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] se reportaron más de 20 millones de hectáreas sembradas con todas las variedades de aguacate de las que se obtuvieron arriba de 675 mil millones de pesos.

El aguacate (*Persea americana*) es una especie perteneciente a la numerosa familia de las Lauráceas, cuyo nombre proviene del náhuatl y significa “testículos de árbol”. Se trata de una de las frutas más emblemáticas por su peculiar sabor y beneficios nutrimentales; la cantidad de lípidos que contiene es mayor en comparación con otras frutas; por su alto contenido en potasio y bajo en sodio, su consumo es adecuado para personas con problemas cardiovasculares (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2020). El mayor consumo de aguacate es en fresco, pero también puede ser comercializado como producto secundario, otorgándole un valor agregado, sin embargo, existen inconvenientes como el mantenimiento del estado óptimo de maduración del fruto.

México no solo encabeza la lista del mayor exportador a nivel mundial, sino también es el mayor consumidor con 8 kg per cápita al año, seguido de Estados Unidos con 3.6 kg y se espera un incremento en los mercados europeo y asiático (Arias, Montoya y Velásquez, 2018; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020). Los principales estados productores del país son Jalisco, Veracruz, Chiapas, Tamaulipas, Oaxaca, y Michoacán. El estado de Puebla se posiciona en el décimo sitio con más de 900 mil ha cosechadas provenientes de municipios como Quimixtlán y Atlixco (SIAP, 2019).

Debido al auge económico y comercial de este producto, también existe un interés desde el ámbito de la investigación con el fin de entender y brindar información sobre el comportamiento fenológico del árbol, sus necesidades ambientales, la localización de áreas potenciales, su reproducción y modificación genética, el manejo del cultivo, así

como los efectos sociales, económicos, políticos y culturales que giran en torno al aguacate. Los antecedentes indican que son concurridas las investigaciones enfocadas al manejo de cultivo. También existen numerosos estudios enfocados a la zonificación del aguacate para las principales entidades de producción, no así para aquellos estados que también contribuyen a la producción nacional y que tienen el potencial del aumento de superficie plantada, como es el caso de Puebla.

La razón principal por la que se realizó esta investigación obedece a que no se tiene registro de un trabajo como el que aquí se desarrolló, basado en los requerimientos agroclimáticos de la planta en vía de una planificación agrícola a corto y largo plazo para la entidad. Además, no se ha profundizado lo suficiente sobre los cambios en los elementos climáticos y su relación con la aptitud para su cultivo, más aun, con el grado de vulnerabilidad socioambiental de los productores.

En este sentido, se pretende proporcionar información tanto a las personas dedicadas a la investigación, como a los agricultores y tomadores de decisiones a cerca de las áreas óptimas para las plantaciones, aquellas que son potenciales, cuáles requieren insumos externos, en dónde existen mayores limitantes como las heladas o dónde se sobreponen con otros usos del suelo, pero también, aquellas en las que se tendría que prestar más atención para prevenir efectos negativos producto del cambio climático.

El segundo motivo tuvo que ver con el fortalecimiento e impulso de las plantaciones de aguacate en esta entidad, pero no bajo un contexto de producción tradicional dominado por el monocultivo que promueve la priorización comercial del producto y el aumento de la frontera agrícola sin considerar el deterioro de recursos tanto ambientales como genéticos, sino desde el enfoque agroclimático donde se realiza la valoración de la aptitud agrícola local o regional, según las disponibilidades climáticas, con el fin de asesorar sobre el tipo de cultivos posibles y técnicas culturales adecuadas y encaminarse a la formulación de una estrategia agrícola idónea y sostenible, agregando el componente social desde el enfoque de la vulnerabilidad socioambiental.

Si bien es cierto que el desarrollo del cultivo de aguacate tiene efectos positivos como el aumento de ingresos económicos tanto en el núcleo familiar como en las regiones donde se produce, también ha traído uno de los principales problemas ambientales: el cambio de uso del suelo forestal al agrícola y el agravamiento de efectos negativos como el

fomento al monocultivo, erosión de recursos genéticos, dependencia de insumos químicos y la consecuente contaminación y degradación al ambiente.

La expansión de cultivos sin una planificación agrícola representa un problema en sí por diversas razones; en ocasiones se suelen introducir especies o variedades en lugares donde no se cumplen satisfactoriamente las necesidades de las plantas (con criterios basados en el valor económico de la producción), lo cual se ve reflejado en bajos rendimientos y producción, que si bien pueden ser subsidiados por insumos químicos (en el caso de factores edáficos y de plagas y enfermedades), de infraestructura (sistemas de riego, invernaderos, protección contra heladas, etc.) y mejora genética, resultan costosos, especialmente para los pequeños productores. Asimismo, el crecimiento de la frontera agrícola hacia espacios de prioridad ambiental como los de conservación o aquellos que resultan más favorables para otros usos del suelo distintos al agrícola, suele considerarse un problema.

Si las plantaciones se encuentran en los sitios óptimos, donde las necesidades agroclimáticas sean satisfechas con el mínimo de insumos, se encaminaría hacia la formulación de una estrategia agrícola idónea y sostenible, ya que estaría en armonía con las características climáticas de la zona, por tanto, no implica amenazas o deterioro de los recursos naturales. Lo anterior no quiere decir que en esos lugares no se presenten fenómenos que pongan en riesgo a los cultivos; lo más conveniente es tener en cuenta dichos eventos para la planificación agrícola, que incluya aquellos a mediano y largo plazo como lo es el cambio climático.

La agricultura es la principal actividad en sentir los efectos del cambio climático. Los cambios en los valores de temperaturas y en el régimen de precipitaciones así como la mayor variabilidad en la frecuencia de eventos climáticos extremos, ocasionarán efectos en los cultivos adaptados a las condiciones promedio actuales del clima, principalmente, en el aspecto fenológico y sobre las necesidades climáticas y la consecuente modificación a la frontera agrícola. Sin embargo, la vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático no sólo depende de las respuestas fisiológicas de las plantas que se traducen en rendimientos, sino que también se relaciona con la capacidad de los sistemas de producción socioeconómicos para contender con las variaciones en la productividad.

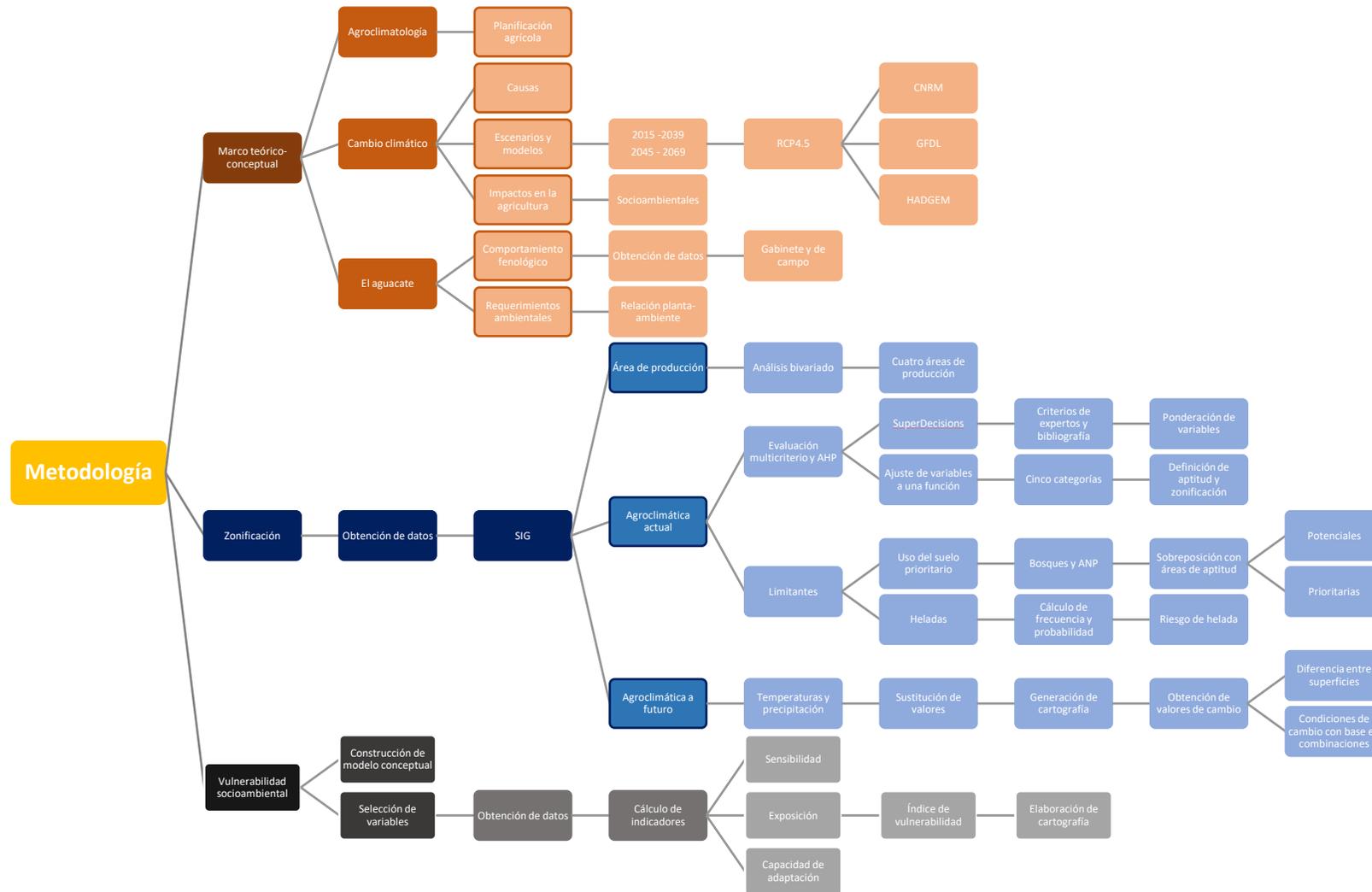
Por lo anterior, se plantearon diversas preguntas que guiaron el proceso de investigación: ¿cuáles son los requerimientos ambientales del aguacate para su establecimiento y

producción? ¿dónde se encuentran las áreas productivas en el estado? ¿son estas áreas las que cuentan con las mejores condiciones agroclimáticas para el aguacate? ¿dónde están las áreas potenciales y las zonas marginales para las plantaciones? ¿en qué sitios hay mayor coincidencia entre las áreas potenciales y el uso del suelo prioritario? ¿cómo se modificarían por efecto del cambio climático? ¿en qué lugares se reducirían y en cuáles aumentarían? ¿cuál es el grado de vulnerabilidad socioambiental ante el cambio climático en los municipios productores de aguacate? ¿qué características los hacen más vulnerables?

El objetivo general consistió en analizar las áreas agroclimáticas óptimas y potenciales, las alteraciones de aptitud por cambios en las variables climáticas en las plantaciones de aguacate, así como el grado de vulnerabilidad socioambiental de los productores ante el cambio climático en Puebla. De tal manera que el primer objetivo particular consistió en identificar los requerimientos ambientales del aguacate, así como el riesgo y la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas ante el cambio climático. El siguiente radicó en zonificar las áreas con aptitud agroclimática en Puebla. Mientras que el tercero se enfocó en reconocer las transiciones de aptitud bajo por cambio climático. El último objetivo residió en estimar la vulnerabilidad socioambiental en los municipios productores de aguacate ante el cambio climático.

Para alcanzar los objetivos, se propuso una metodología con base en estudios agroclimáticos previos pero robustecida con nuevos criterios, como el empleo de métodos estadísticos, de evaluación multicriterio, de zonificación y estimación de la vulnerabilidad y del uso de herramientas como los sistemas de información geográfica, hojas de cálculo y softwares para ponderación de variables, tal y como se sintetiza en el esquema 1 y que se detalla en cada uno de los capítulos.

La estructura capitular se conformó de la siguiente manera: en el primero se abordan los aspectos teóricos y conceptuales sobre los tres ejes en los que se sitúa la investigación: la agroclimatología, cambio climático y la planta de aguacate. Mientras que en el segundo se realiza la descripción del área de estudio, se examinan los datos agrícolas del aguacate, se detalla la metodología empleada para la zonificación actual y bajo escenarios de cambio climático y se analizan los resultados. El capítulo final versa sobre los aspectos de la vulnerabilidad, sus componentes, los datos e indicadores empleados, así como su justificación, la metodología utilizada para la estimación de la vulnerabilidad y los resultados obtenidos.



Esquema 1. Metodología empleada. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 1. Agroclimatología del aguacate, cambio climático, riesgo y vulnerabilidad

1.1 La Agroclimatología

Prácticamente, desde el momento en que los seres humanos comenzaron la domesticación de plantas y animales se tuvo conocimiento de la influencia de las condiciones ambientales sobre la vida y producción de sus cultivos y ganados (Pascale y Damario, 2004). Con el tiempo, las observaciones empíricas relacionadas con los cultivos y los factores ambientales, especialmente aquellas de causa meteorológica y climática, sirvieron como sustento para obtener las primeras bases científicas de distintas disciplinas como la agrometeorología, meteorología agrícola, bioclimatología y agroclimatología. En el campo de la agroclimatología, las investigaciones realizadas por De Fina (1949), Papadakis (1954), Azzi (1959), Nuthonson (1959), Wang (1963) y Gerbier (1980) sentaron de las bases para el desarrollo de la disciplina.

De acuerdo con Arteaga y Romo (1983), la agroclimatología estudia las leyes y principios que relacionan los elementos y factores del clima con el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas. Algunos de los objetivos de la disciplina se relacionan con: i) el análisis de las características espaciales y temporales que presentan los elementos meteorológicos favorables o desfavorables a la producción agrícola; ii) la valoración de la aptitud agrícola local o regional, según las disponibilidades climáticas, con el fin de asesorar sobre el tipo de cultivos posibles, técnicas culturales adecuadas y analogías agroclimáticas (Pascale y Damario, 2004); y iii) con la contribución a reducir los daños en la producción agrícola que puedan ser causados directa o indirectamente por el clima (Campos, 2005). Asimismo, son dos las vertientes que se proponen en agroclimatología; por un lado la de investigación, cuyo objetivo es profundizar en el conocimiento de las relaciones que existen entre el clima y la actividad agrícola; y por otro la aplicada, que proporciona las bases científicas para optimizar la toma de decisiones en planificación agrícola (Hernández, 1993).

Bajo el contexto anterior, la agroclimatología se apoya de dos tipos de datos para llevar a cabo su metodología y alcanzar sus objetivos: datos fenológicos y climáticos.

Los fenómenos biológicos observables en la naturaleza presentan un ritmo estacional de ocurrencia variable, de un lugar y de un año a otro, de acuerdo con las variaciones meteorológicas o climáticas que suceden. La fenología, una disciplina que proviene de la ecología, se encarga del estudio de los fenómenos periódicos de los seres vivos y sus relaciones con las condiciones ambientales, como radiación solar, temperatura, humedad, entre otros, analizando y cotejando las variaciones geográficas y temporales que determinan la apariencia de los seres vivos como respuesta a las alteraciones ambientales en tiempo y espacio (Pascale y Damario, 2004). Dentro de la fenología existe una división entre la vegetal y animal, siendo la primera la que interesa a la agroclimatología, puesto que en esta se estudian los fenómenos periódicos de los vegetales y su relación con el clima y tiempo atmosférico (Arteaga y Romo, 1983).

En este sentido, es importante aclarar algunos de los conceptos propios de la fenología que son empleados de manera recurrente en estudios agroclimáticos como el presente.

El crecimiento de las plantas, y en particular de los cultivos, es el proceso de acumulación y traslocación de la materia fotosintetizada, y está controlado principalmente por la disponibilidad de agua, nutrición y la intensidad de la radiación solar. Por otra parte, el desarrollo es el progreso del cultivo a través de sus diversas etapas fenológicas que consiste esencialmente en el cambio de su estructura morfológica (Campos, 2005).

En relación con lo anterior, existe una división del desarrollo de las plantas que corresponde a fases fenológicas y subperiodos o etapas. Una fase es un periodo de tiempo relativamente corto (días, semanas) en que la planta pasa de un estadio a otro. Mientras que el subperiodo o etapa se refiere al periodo de tiempo más o menos largo (semanas, incluso meses) en que se desarrolla un órgano de la planta (tallo, flor, fruto, etcétera), por lo regular, dos fases fenológicas delimitan una etapa (Gómez, 1988).

Con fines prácticos, generalmente se suele dividir el ciclo de vida de las plantas en dos periodos; vegetativo y reproductivo. El periodo vegetativo consiste en la formación y crecimiento del tallo, hojas y raíces. En el periodo reproductivo se forman las flores como las estructuras reproductivas; ciertas plantas tienen su ciclo reproductivo anualmente, por lo que, una vez al año crecen, se reproducen y mueren (ej. arroz, maíz, sandía, entre otras), mientras que las plantas no anuales producen flores varias veces al año (ej. aguacate, cacao, etcétera).

De tal manera que las observaciones, registro y modelado del comportamiento fenológico de los cultivos corresponden sólo a una parte de los insumos necesarios para llevar a cabo un análisis de carácter agroclimático.

El segundo componente pertenece a la información climática. Los elementos más importantes que tienen gran influencia en las plantas son la radiación solar, la temperatura y la disponibilidad de agua. Los datos que corresponden a estos elementos son extraídos de bases climáticas, los cuales son medidos y registrados en observatorios y estaciones meteorológicas. Una vez que se cuenta con ambos (datos fenológicos y climáticos), se emplea el método agroclimático que consiste en determinar la relación entre clima-planta y su distribución geográfica donde sus exigencias puedan ser adecuadamente satisfechas. De esta forma, los resultados obtenidos pueden ser empelados de diversas maneras. Hernández (1993) cita a Gerbier (1980) para señalar que la información agroclimática repercute en los agricultores individuales, a escala regional y nacional, y en la planificación del desarrollo. Esta información también puede ser utilizada en decisiones a corto plazo, en actividades agrícolas relacionadas con el manejo del cultivo o el pronóstico de cosechas, o largo plazo, por ejemplo, para la selección del terreno favorable para un cultivo (Campos, 2005).

La agroclimatología se ha ido fortaleciendo a tal punto que no sólo se limita a la identificación de áreas óptimas. Al respecto, Campos (2005) indica que la agroclimatología contribuye a la formulación de una estrategia agrícola idónea y sostenible, ya que está en armonía con las características climáticas de la zona, por tanto, no implica amenazas o deterioro de los recursos naturales. En ocasiones, también se integra en los análisis agroclimáticos el componente social para reconocer aspectos como vulnerabilidad y riesgo a eventos climáticos extremos o al cambio climático en los sistemas agrícolas.

El clima es probablemente el factor más importante en la planificación agrícola, los otros factores son complementarios ya que pueden modificarse y adaptarse a las necesidades de los cultivos (Pascale y Damario, 2004; Campos, 2005). En este sentido, el cambio en el clima afecta directamente a la planificación agrícola y a muchos de los procesos relacionados con la agricultura, razón por la cual ha ido en aumento el interés por conocer la influencia del cambio en los elementos del clima producto de un cambio climático global y su repercusión en esta actividad económica, tanto en los cultivos, su comportamiento fenológico, aumento o disminución de las áreas potenciales, incidencia

de eventos hidrometeorológicos extremos, hasta las consecuencias sociales, políticas, económicas y culturales en la agricultura. Por tal motivo, en las páginas consecuentes se tratará acerca del cambio climático: qué se entiende por cambio climático y cuáles son sus impactos en la agricultura.

1.2 Cambio climático y sus causas

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés] define al cambio climático como:

Variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persisten durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos extremos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

En la definición que emite el IPCC, el cambio climático puede deberse a procesos naturales (tanto internos como externos) y a la actividad humana. De manera natural han existido cambios radicales en el clima planetario debido a modificaciones en la rotación, en la órbita y en la inclinación de la Tierra (ej. las glaciaciones), o por eventos naturales extraordinarios como las erupciones volcánicas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2018). Sin embargo, la concepción del cambio climático actual se relaciona con causas de origen antrópico, cuyas actividades han acelerado procesos naturales en un periodo de tiempo relativamente rápido.

En este sentido, las causas de carácter antrópico relacionadas con el cambio climático se basan en los cambios observados en el sistema climático, principalmente en las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI, en adelante) en la atmósfera producto de distintos sectores (en general, por la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo) y el consecuente aumento en la temperatura media global de la superficie¹, por lo tanto, para comprender el cambio climático es necesario entender antes el fenómeno conocido como efecto invernadero.

¹ Es el promedio global estimado de las temperaturas del aire cerca de la superficie sobre la tierra, el hielo marino y las temperaturas de la superficie del mar sobre las regiones oceánicas sin hielo, con cambios normalmente expresados como desviaciones de un valor durante un período de referencia específico (IPCC, 2014).

El entendimiento del efecto invernadero y el origen del calentamiento global en los tiempos actuales se remontan a la obra del científico francés Fourier a principios del siglo XIX. Fourier (1820) tenía en cuenta que la energía que llega a la Tierra desde el Sol se absorbe y se irradia al espacio. Cuando este científico calculó la diferencia entre la energía que entra y la que sale descubrió que el planeta debería, en teoría, congelarse. Concluyó que la atmósfera actúa como un “manto” que conserva una proporción de calor y hace que el planeta sea habitable para los seres humanos y demás organismos.

Posteriormente, las observaciones realizadas por J. Tyndall (1861) contribuyeron a descubrir que los gases que componen la mayor parte de la atmósfera (nitrógeno y oxígeno) no ofrecen ninguna barrera para la energía electromagnética, sin embargo, existen gases (en menor cantidad) que absorben una parte del espectro electromagnético y que producen lo que se llamó efecto invernadero. Estos gases son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, entre otros, y están presentes en cantidades pequeñas, por lo que, los científicos utilizaron el cálculo de partes por millón (ppm) para medir el nivel de GEI, donde una ppm es equivalente a 0.0001%.

Conforme los avances científico-tecnológicos fueron en aumento, se tuvieron mayores herramientas y cuerpos teóricos sobre el comportamiento de la atmósfera, el efecto invernadero y sus causas. En épocas más recientes, desde el ámbito científico se ha dicho que en los últimos 150 años los gases de efecto invernadero en la atmósfera han aumentado progresivamente con la expansión de la producción industrial, el cambio de uso del suelo, la deforestación y otros factores. La evidencia muestra que en ningún momento durante los últimos 650 000 años, el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera ha sido tan alto como lo es hoy; generalmente se había mantenido por debajo de 290 ppm, sin embargo, a principios de 2008, había alcanzado 387 ppm (Giddens, 2009), y para el año 2017, la Organización de las Naciones Unidas [ONU] y la Organización Meteorológica Mundial [OMM] reportaron que la concentración de CO₂ en la atmósfera es de 405.5 ppm (ONU-OMM, 2018). Es bajo este tenor que surge la idea de que el cambio climático es propiciado por las actividades antrópicas.

Ahora bien, prácticamente existen dos posturas generales cuando se habla de cambio climático: aquella que proviene del ámbito científico y la del escepticismo. Lo que cambia entre ellas, e incluso al interior de cada postura, son los discursos que emplean.

Uno de los más recurridos es donde se alude a que el cambio climático se trata en realidad de una variabilidad climática. Al respecto, Jamieson (2014) propone abandonar el paradigma cambio/estabilidad en el que se suele contextualizar el cambio climático, es decir, él sugiere ver a los registros (del comportamiento del clima) como variaciones espacio temporales en lugar de anomalías, y que esto se logra al cambiar la dimensión temporal para ver al cambio como una variabilidad, ya que, lo que parece ser un “cambio climático” desde un escenario base del siglo XIX (como se suele encuadrar), puede parecer una variabilidad desde la perspectiva de milenios. Añade que incluso si se acepta la idea de que el cambio climático ocurre, aun no se tiene un problema², ya que ocurren cambios todo el tiempo pero nosotros no los consideramos como problemas.

No obstante, aunque comparten similitudes epistemológicas tanto la variabilidad y el cambio climático, la diferencia sustancial es que bajo el contexto del cambio climático, las actividades humanas han acelerado dicha variabilidad en un periodo de tiempo relativamente rápido.

Otras posturas que provienen principalmente del escepticismo son recopiladas por Giddens (2009) en su análisis sobre el cambio climático, riesgo y peligro, entre ellas se encuentran las de Singer y Dennis (2007) quienes señalan que no hay nada nuevo con el aumento de las temperaturas que se observan hoy en día, que el clima siempre ha estado en constante cambio (impulsado por variaciones solares) y que estamos en la fase de calentamiento de un ciclo solar, incluso, lo que debería preocuparnos en un futuro es una era de hielo venidera. Por su parte, Patrick (2004) afirma que los hechos y hallazgos en cuanto al cambio climático que no se ajustan a la historia principal son suprimidos o ignorados. Mientras que Lomborg (2001) acepta que el calentamiento global está sucediendo y que la actividad humana lo ha provocado, lo que cuestiona es la idea de que los riesgos del cambio climático inevitablemente tengan prioridad sobre todos los demás como la pobreza mundial, propagación de enfermedades o las armas nucleares que plantean mayores problemas. Una postura algo distinta es la que expone Pearce (2007), y es que el clima del mundo no implica un cambio gradual como lo muestra la historia pasada de la variación climática; las transiciones de una condición climática a otra son a menudo muy abruptas y es probable que el cambio climático en nuestra época sea igual,

² Lo necesario para que sea considerado como problema es que afecte de manera negativa a lo que nos importa, que sea causado por la acción humana y que se pueda remediar de alguna manera (Jamieson, 2014).

es decir, si se trata de un cambio radical y agudo, se alcanza un punto de inflexión que desencadena una sacudida repentina de un sistema a otro. Esta idea es interesante ya que no se suelen tener proyecciones con estos cambios rápidos y abruptos, más bien se suele concebir como gradual, sin embargo, si hay consenso en que el cambio en la temperatura causaría un efecto dominó en todos los sistemas.

A pesar de los discursos que se utilizan desde el ámbito del escepticismo, existe evidencia que indica que el cambio climático no es un invento más de la ciencia, o que obedece a intereses político-económicos, o que se trata de una variabilidad climática natural, lo que diferencia el poder discursivo científico del escéptico es el rigor con el que son tratados los datos e información para argumentar, donde sale a relucir la labor realizada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, mientras que la parte escéptica se vale de elementos como los escenarios sobre posibilidades futuras, la incertidumbre y la falta de consenso que se encuentran en publicaciones de distintas fuentes.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático es el organismo más reconocido en materia de cambio climático. Fue establecido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] y la Organización Meteorológica Mundial en 1988 y tiene por objetivo proporcionar evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta (Gómez, 2017). Ha tenido un enorme impacto en el pensamiento mundial sobre el calentamiento global, cuyos objetivos declarados radican en reunir la mayor cantidad posible de datos científicos sobre las condiciones climáticas, someterlos a una revisión rigurosa y llegar a conclusiones generales sobre el estado científico en materia de cambio climático (Giddens, 2009).

El IPCC se conforma por tres grupos de trabajo y cada uno se orienta en un rubro específico; el grupo uno se encarga de las bases físicas; el segundo de los impactos, adaptación y vulnerabilidad; y el tercero en la mitigación.

Desde su creación, el IPCC publica los informes de evaluación, así como algunos reportes especiales, y en cada uno de ellos emplea un lenguaje calibrado para expresar el grado de confianza en sus principales conclusiones.

En 1990 se publicó el primer informe de evaluación, donde se subrayó la importancia del cambio climático como un desafío con consecuencias globales y la necesaria cooperación

internacional. El segundo de ellos salió en 1995, donde se proporcionó material sustancial para que los gobiernos aprovecharan el periodo previo a la adopción del Protocolo de Kioto en 1997. El tercer informe de evaluación del 2001 se centró en los impactos del cambio climático y la necesidad de adaptación. Para el año 2007 se dio a conocer el cuarto informe de evaluación, el cual sentó las bases para un convenio posterior a Kioto, comenzando por el acuerdo en limitar el calentamiento a 2°C. El quinto informe de evaluación se concretó en 2014 y es el que sirve de base para los trabajos relacionados con el cambio climático en la actualidad. Cabe señalar que en 2018 se publicó un informe especial sobre el calentamiento global a 1.5°C y se espera que para el año 2022 se finalice el sexto informe de evaluación (IPCC, 2019).

En el quinto informe del IPCC se dice de manera afirmativa que “el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado” (IPCC, 2014). La aseveración anterior es producto de la evidencia científica observada y documentada en diversas partes del mundo.

En el documento más reciente publicado por el IPCC (2018) se dice con un alto nivel de confianza que las actividades humanas han provocado aproximadamente 1.0°C del calentamiento global por encima de los niveles preindustriales³ con un rango probable de 0.8° a 1.2°C, y es probable que el calentamiento global alcance 1.5°C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual. Lo anterior quiere decir que los riesgos relacionados con el clima para los sistemas naturales y humanos serían más altos que en la actualidad, ya que los modelos muestran cambios en la temperatura media en la mayoría de las regiones terrestres y oceánicas (alta confianza), extremos cálidos en la mayoría de las regiones habitadas (confianza alta), precipitaciones intensas en varias regiones (confianza media) y la probabilidad de déficit por sequía y precipitación en algunas regiones (confianza media).

³ Se refiere al período de varios siglos anterior al inicio de la actividad industrial a gran escala alrededor de 1750. El período de referencia 1850–1900 se utiliza para aproximar la temperatura preindustrial (IPCC, 2014).

1.3 Escenarios y modelos

A fin de elaborar proyecciones del cambio climático, se precisa información sobre las futuras emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros impulsores del cambio climático. Esta información generalmente se expresa como un escenario⁴ de actividades humanas. Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro escenarios nuevos denominados trayectorias de concentraciones representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Los escenarios de RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y del ciclo global del carbono (IPCC, 2014).

Los RCP se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo⁵ total en el año 2100 en relación con 1750 y tienen las siguientes características (IPCC, 2014):

- RCP2.6: el forzamiento radiativo bajo este escenario es de 2.6 Wm^2 con una concentración de 475 ppm al año 2100
- RCP4.5: el forzamiento radiativo en este escenario es de 4.5 Wm^2 y una concentración de 630 ppm al 2100
- RCP6.0: el forzamiento radiativo bajo este escenario es de 6.0 Wm^2 y una concentración de 800 ppm al 2100
- RCP8.5: el forzamiento radiativo sería de 8.5 Wm^2 y una concentración de 1 313 ppm al 2100.

Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6); dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto

⁴ Descripción plausible de un futuro verosímil, basada en un conjunto consistente y coherente de supuestos sobre las fuerzas motrices y sobre las relaciones más importantes. Cabe aclarar que los escenarios no son ni predicciones ni pronósticos, pero son útiles, ya que ofrecen un panorama de las consecuencias de la evolución de distintas situaciones y medidas (IPCC, 2014).

⁵ Variación expresada en Wm^{-2} del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera, debida a la variación del causante externo del cambio climático (ver IPCC, 2013), es decir, se refiere a un proceso que altera el balance energético del sistema climático global o parte de él (Fernández *et al.*, 2015). Los valores señalados deben entenderse únicamente a título indicativo, ya que el forzamiento climático resultante de todos los impulsores varía entre los distintos modelos, debido a las características propias del modelo y al modo específico en que se consideran los elementos de forzamiento climático de corta vida (IPCC, 2014).

invernadero (RCP8.5). Cada uno de los RCP fue producido por un modelo de evaluación integrado diferente, por lo que tienen su propio escenario de referencia, por ejemplo, el Modelo de Evaluación de Cambio Global fue el empleado como escenario de referencia para el RCP4.5 y tiene las siguientes características:

Describe un mundo en el que la población mundial alcanza un máximo de 9 mil millones en 2065 y luego disminuye a 8.7 mil millones en 2100, mientras que el producto interno bruto mundial crece en orden de magnitud, el consumo global de energía primaria se triplica [...], no incluye políticas explícitas para limitar las emisiones de carbono, por lo tanto, los combustibles fósiles continúan dominando el consumo mundial de energía a pesar del crecimiento sustancial de energía nuclear y renovable [...], las concentraciones atmosféricas de CO₂ aumentan a lo largo del siglo y alcanzan 792 ppm para 2100, con un forzamiento radiativo total cercano a 7 Wm². Las emisiones de CH₄ y N₂O también continúan aumentando con el uso constante de combustibles fósiles y la expansión de tierras agrícolas. Las áreas forestales disminuyen para acomodar los aumentos en el uso de la tierra para cultivos alimentarios y bioenergéticos. Incluso con los supuestos aumentos de la productividad agrícola, las tierras de cultivo se acrecientan en la primera mitad del siglo debido al aumento de la población y los ingresos, lo que impulsa un incremento en el consumo de carne intensivo. Después de 2050, la tasa de crecimiento de la demanda de alimentos se desacelera, en parte debido a la disminución de la población. Como resultado, el área de tierras de cultivo y el cambio de uso del suelo disminuyen (Thomson *et al.*, 2011).

Las condiciones del escenario de estabilización RCP4.5 con respecto al escenario de referencia las describen Thomson *et al.* (2010) y Thomson y colaboradores (2011), entre las más relevantes se encuentran:

- Aplicación de políticas de valoración de emisiones de GEI para estabilizar el forzamiento radiativo a 4.5 Wm². Esta estabilización se logra a partir del año 2080
- Contemplación disminuciones en el uso general de energía, en el uso de combustibles fósiles en comparación con el escenario de referencia, mientras que aumentan de manera sustancial las formas de energía nuclear y renovable
- La aparición de captura y almacenamiento de dióxido de carbono a gran escala; el aumento en la expansión de los bosques como medida de mitigación
- El abuso en el consumo de combustibles fósiles y las emisiones del uso de la tierra suponen una tasa de cobro; se trata de otra estrategia de mitigación global
- Las emisiones anuales de cambio de uso del suelo alcanzan un pico de 42 Gt CO₂ anuales alrededor de 2040 y disminuyen a 15 Gt CO₂ en 2080.

En resumen, el RCP4.5 se caracteriza por contemplar políticas de mitigación que conlleven a que el aumento de GEI disminuya y se estabilice a finales de siglo, por lo tanto, se considera un escenario en el cual los cambios esperados no son tan drásticos como bien pueden ser los RCP2.0 y RCP8.5; sin embargo, es importante tener en cuenta que los cambios en las variables climáticas también varían en función al modelo de circulación global empleado. Cada escenario cuenta con distintos modelos climáticos en los que se simulan los cambios en las variables de temperatura y precipitación. Para el caso de México, el Centro de Ciencias de la Atmósfera [UNIATMOS] de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM] y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático desarrollaron escenarios climáticos con distintos modelos a nivel regional para diferentes horizontes futuro cercano (2015-2039) y lejano (2075-2099) con el fin de que sirvan como insumo para la elaboración de estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático (Fernández *et al.*, 2015). Estos escenarios incluyen los modelos⁶ CNRM-CM5 (Francia), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA) y HADGEM2-ES (Met Office Hadley, UK).

1.4 Impactos en la agricultura

Hasta ahora se ha abordado la conceptualización del cambio climático, sus causas, posturas, evidencias, su divulgación a partir de los informes realizados por el IPCC, y los modelos y escenarios que se emplean actualmente para las investigaciones relacionadas con el cambio climático. Enseguida, se refieren los efectos o impactos potenciales producto de un cambio en el clima, con énfasis en aquellos relacionados con la agricultura (ocurrencia de eventos extremos, relación clima-fenología de cultivos, producción agrícola, entre otros) y específicamente con las especies frutales como el aguacate.

Los impactos o efectos son el resultado de la combinación de una amenaza y la vulnerabilidad que presente el sistema en el cual suceda un evento. Existen principalmente dos tipos de impactos: los globales como el cambio en la temperatura y precipitación, y los locales, que determina las actividades de los habitantes, como las económicas o el desarrollo social (Hernández *et al.*, 2014). Por lo tanto, los efectos no serán uniformes entre países ni al interior de estos; dependerán en gran medida de las condiciones locales, tanto climáticas como de otro tipo, y de cómo dichas condiciones se

⁶ Lo referente a los modelos climáticos, sus características, lineamientos metodológicos, resultados y evaluaciones se pueden conocer a detalle en (Collins *et al.*, 2008; Griffies *et al.*, 2011; y Voldoire *et al.*, 2011).

modifiquen con el tiempo en respuesta al cambio climático y a otros fenómenos como el crecimiento económico (Mendelsohn y Seo, 2007).

Los sistemas agrícolas en general están bien adaptados a las condiciones promedio normales del clima, pero son susceptibles a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos⁷ (Smit y Skinner, 2002). Tomando en cuenta lo anterior, el IPCC ha realizado evaluaciones de probabilidad o confianza de las proyecciones para los eventos extremos para finales del siglo XX hasta el siglo XXI, entre ellas se encuentran las siguientes probabilidades (IPCC, 2012):

- Es muy probable que haya habido una disminución general en el número de días y noches frías, y un aumento en el número de días y noches cálidas
- En muchas (pero no en todas) regiones del mundo con datos suficientes, el número de periodos cálidos u olas de calor han aumentado, situación que aumentará
- Es probable que la frecuencia de fuertes precipitaciones se incremente en el siglo XXI en muchas áreas del mundo, particularmente el caso en las latitudes altas y regiones tropicales, y en invierno en las latitudes medias del norte
- Las sequías se intensificarán en el siglo XXI en algunas estaciones y áreas, debido a la reducción de la precipitación y / o al aumento de la evapotranspiración.

No obstante, dependiendo de las condiciones de exposición y vulnerabilidad de un sistema, los extremos también pueden ser aquellos eventos de frecuente recurrencia y de impacto concatenado que generan presiones y daños a los cultivos, aun cuando no sean considerados como extremos estadísticos (Lavell, 2011).

Como señala Ruiz (2012) el cambio climático está relacionado con la aceleración en el desarrollo de los cultivos, lo que acorta los ciclos de producción y con ello se reduce el rendimiento y la demanda de agua y además aumenta la incidencia de eventos climáticos extremos. Asimismo, el calentamiento del planeta disminuye la duración del periodo de heladas e incrementa la temperatura de regiones agrícolas templadas y semifrías, ejemplo de lo anterior son los resultados que obtuvieron Rochette *et al.* (2004) quienes prevén afectaciones en la fruticultura del clima templado en Canadá, principalmente por inviernos menos fríos.

⁷ La confianza en los cambios observados de los extremos climáticos depende de la calidad y cantidad de datos (y de los estudios subsecuentes), sin embargo, los eventos extremos son “raros”, lo que significa que es más difícil identificar los cambios a largo plazo, tanto su frecuencia como su intensidad (IPCC, 2012).

Ahora bien, los efectos del cambio climático tienen una gran influencia en la producción agrícola, ya que esta es sensible a dos tipos de efectos inducidos por el clima (Torres *et al.*, 2009):

- Los efectos directos que son producidos por cambios en la temperatura, la precipitación y las concentraciones de CO₂
- Los efectos indirectos, que ocurren por los cambios de humedad del suelo y la distribución y frecuencia del ataque de plagas y enfermedades.

En este sentido, Field *et al.* (1992) y Etterson y Shaw (2001) mencionan que las plantas tienen una respuesta ante los cambios ambientales: migran o se adaptan, es decir, tienden a responder a los desequilibrios causados por variaciones ambientales y suelen compensarlo. Uno de los efectos de las alteraciones ambientales sobre la vegetación tiene lugar en la fenología de las plantas. Por esa razón, Alvarado *et al.* (2002) indican que estos cambios repercutirán en especies cuya floración u otra fase o etapa está controlada por la temperatura, así como en plantas donde el fotoperiodo es determinante, e incluso donde la disponibilidad de agua sea el factor que desencadene un determinado evento fenológico.

En relación con lo anterior, diversas investigaciones han señalado algunos de los impactos en la fenología de especies frutales relacionados con el cambio climático, como el caso de las alteraciones en el ciclo vegetativo y reproductivo en la vid y las pomáceas, en las que se ha observado un retraso en las floraciones y madurez (IPCC, 2014). Asimismo, el atraso de la floración del nogal por disminución de las horas frío en Sonora, México como lo abordaron Grageda *et al.* (2016); la floración y fructificación del café y su relación con el aumento de temperatura y la disponibilidad de agua en Veracruz, México en los estudios realizados por Villers *et al.* (2009) y Craparo (2017); o las afectaciones fenológicas de floración y desarrollo del fruto del aguacate (Howden *et al.*, 2005; Putland *et al.*, 2011). En todas ellas, existe la posibilidad de la disminución de la producción y distribución espacial óptima de los cultivos.

Con relación a la idea anterior, diversos estudios indican cambios en la distribución de plantaciones de frutales debido al cambio climático:

Por un lado, Tubiello *et al.* (2002) realizaron las proyecciones de producción de algunos cultivos bajo dos modelos de cambio climático al 2030 y 2090; indican que los resultados positivos (en rendimientos) dependen en gran medida de los aumentos de precipitación

proyectados por los escenarios climáticos, por lo que su distribución espacial se ve favorecida.

En contraste, Gay *et al.* (2004) enuncian que la producción de café al año 2050 en Veracruz, podría disminuir entre un 73% y 78% debido a los cambios en las variables de temperatura y precipitación bajo dos modelos de cambio climático y un escenario severo (A2). Mientras que Monterroso *et al.* (2007) realizaron un estudio a una escala regional en la misma entidad mexicana con una metodología y modelos de cambio climático distintos y señalan que la disminución de la precipitación de entre 10% y 20% (respecto de los valores observados) y un incremento de la temperatura de hasta 4°C en la región al año 2050 no hacen más vulnerable a la producción de café, ya que, sólo el 38% de la superficie de la superficie destinada a esta plantación presenta condiciones no aptas.

Por otra parte, Länderach *et al.* (2011) argumentan que para el 2050, bajo 19 escenarios de cambio climático, algunas áreas productoras de cacao actuales se volverían inadecuadas y que se requerirá un cambio de cultivo; en otras zonas se necesitarían adaptaciones en el manejo agronómico; y en otras la aptitud aumentaría. Schroth *et al.* (2016) añaden que las temperaturas máximas de la estación seca se volverán limitantes para las plantaciones, así como la disponibilidad de agua en dicha estación, y que además existe una diferenciación espacial de vulnerabilidad climática que puede llevar a futuros cambios en la producción de cacao dentro de la región de mayor producción en África.

Para el caso de las plantaciones de aguacate, Ortiz y Ortega (2015) presentan una estimación de la vulnerabilidad en la franja aguacatera en Michoacán, combinando los aspectos de los productores agrícolas, con factores socioeconómicos a nivel municipal y escenarios de cambio climático regionales. Por su parte, Álvarez *et al.* (2017) señalan que la fenología del aguacate Hass cultivado en Michoacán es vulnerable al cambio climático por dos amenazas: el aumento en la temperatura máxima y el retraso de la inflexión en la temperatura mínima, lo que apunta que las mejores condiciones a futuro en la región productora de aguacate en Michoacán corresponden al clima semicálido subhúmedo.

De acuerdo con las distintas investigaciones, necesariamente se debe tener en cuenta que no todos los cultivos demuestran la misma sensibilidad ante impactos climáticos (López y Hernández, 2016). Los impactos en los sistemas agrícolas son distintos y dependen de múltiples factores, como la plasticidad ambiental de los cultivos, la vulnerabilidad, tanto ambiental como socioeconómica de los productores y sus familias, y el grado de riesgo y

amenaza que implica el cambio climático. En este sentido, el riesgo de los impactos conexos al clima se deriva de la interacción de los peligros climáticos con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales, incluida su capacidad de adaptación (IPCC, 2014). Por lo anterior, necesariamente se deben abordar los conceptos de riesgo y vulnerabilidad.

1.5 Riesgo y vulnerabilidad al cambio climático

Antes de presentar una definición reconocida del concepto de riesgo, es pertinente tomar en cuenta algunas consideraciones importantes que se hacen respecto su concepción y que ayudarán a comprender por qué hay desacuerdo cuando se vincula al cambio climático. Douglas y Wildavsky (1983) afirman que no podemos conocer el riesgo al que nos enfrentamos pero que deberíamos actuar como si lo supiéramos. Esto debido a que el riesgo tiene tres peculiaridades: la primera versa sobre el desacuerdo de lo que significa un riesgo; la segunda es que, diferentes personas se preocupan por diferentes riesgos; la tercera radica en que el conocimiento y la acción no están sincronizados. En otras palabras, sigue habiendo un desacuerdo sustancial sobre qué es riesgoso, qué tan riesgoso es y qué hacer al respecto (ver el capítulo titulado *Can we know the risks we face?* del libro *Risk and Culture* de Douglas y Wildavsky, 1983).

Los mismos autores citados indican que para poner los problemas en perspectiva, el riesgo debe verse como un producto conjunto del conocimiento sobre el futuro y el consentimiento acerca de las perspectivas más deseadas (Figura 1):

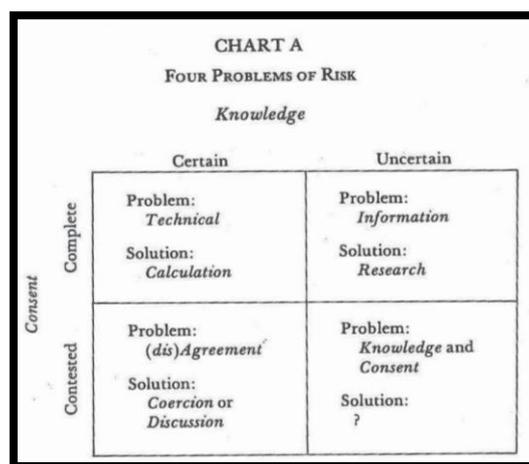


Figura 1. Cuatro problemas del riesgo. Fuente: Douglas y Wildavsky (1983).

En el esquema anterior, el cambio climático se localizaría en el cuarto sector, dado que hay incertidumbre respecto al conocimiento que se tiene y no hay completo consenso. Por

tales motivos, se puede entender por qué existen diferentes discursos respecto al cambio climático.

Ahora bien, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres [UNISDR, por sus siglas en inglés] (2009) define al riesgo como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad. Los riesgos se suelen clasificar en función a la amenaza, así, se encuentran los geológicos, hidrometeorológicos⁸ y químicos-sanitarios.

Mientras que la vulnerabilidad la define el IPCC (2014) como la propensión o predisposición a ser afectado negativamente, y comprende una variedad de componentes que indican la sensibilidad o susceptibilidad al daño, la exposición y la falta de capacidad de respuesta o adaptación. Específicamente, el mismo organismo define a la vulnerabilidad al cambio climático como el grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático, y en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos; la vulnerabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación (Figura 2).

Con la intención de esclarecer los conceptos que integran a la vulnerabilidad, se presenta la definición de estos componentes con base en lo señalado por el INECC (2016):

- **Exposición.** Se refiere al tipo y grado, o naturaleza, a la que un sistema está expuesto a variaciones climáticas significativas. Para el caso del cambio climático, se recomienda realizar el análisis con relación a los cambios en el comportamiento de la precipitación, temperatura y eventos extremos, con base en el clima observado y los escenarios de cambio climático.
- **Sensibilidad.** Es el grado en que un sistema resulta afectado de manera positiva o negativa, por la variabilidad o cambio climático. Los efectos pueden ser directos

⁸ En esta categoría se suele encuadrar el riesgo al cambio climático y el agroclimático, el cual se establece por relación de la probable afectación climática determinada por los parámetros de precipitación y temperatura sobre los cultivos, cuya vulnerabilidad estará representada por la susceptibilidad del cultivo en sus diferentes ciclos de desarrollo y la capacidad de enfrentar las adversidades representada por las prácticas de manejo del agricultor, y la relación de esto, junto con la exposición del cultivo, representada principalmente por las características del suelo, la presencia del cultivo en zonas de recurrencia de eventos adversos como inundaciones y heladas (UNISDR, 2009).

(por ejemplo, cambios en los rendimientos de los cultivos en respuesta a una variación de temperatura) o indirectos (ej. daños causados por inundaciones por efecto de las precipitaciones).

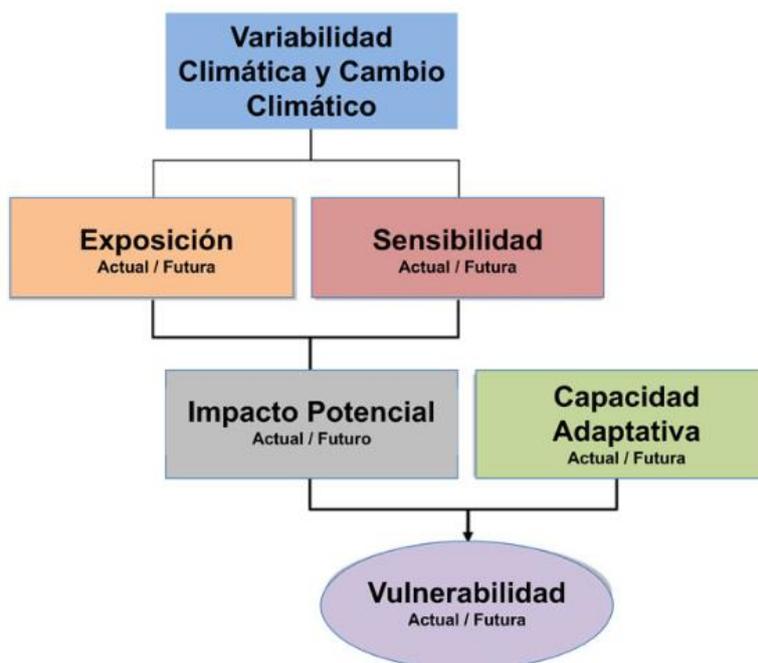


Figura 2. Componentes de la vulnerabilidad. Fuente: (INECC, 2016).

- Capacidad adaptativa. Son las capacidades, recursos e instituciones en diferentes niveles de análisis que permiten detonar procesos de adaptación; algunos de los elementos que se derivan de la capacidad adaptativa son los referentes a la articulación de acciones, recursos financieros e instrumentos de planeación vinculados con la adaptación al cambio climático, que tengan una coherencia territorial en función de las problemáticas detectadas. Además, se consideran las estructuras administrativas, el marco legal y las redes de cooperación y coordinación entre diversos actores.

Es común encontrar la expresión de la vulnerabilidad definida como producto de la exposición por la susceptibilidad entre la resiliencia⁹, o bien, la suma de la exposición y

⁹ Una acepción de la resiliencia indica que es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño [CIFEN], 2017).

sensibilidad menos la capacidad de adaptación, ambas expresiones son estimadas por medio de indicadores.

Hinkel (2011) menciona que la vulnerabilidad es un concepto teórico, por lo tanto, no se puede medir, por lo que es más preciso hablar sobre cómo hacer que el concepto sea operativo. En este sentido, los indicadores¹⁰ constituyen un enfoque para hacer operacionales¹¹ los conceptos teóricos. Él propone una serie de pasos involucrados en el desarrollo de indicadores de vulnerabilidad: 1) definir qué se quiere indicar, 2) seleccionar las variables indicadoras y 3) la función del indicador. El mismo autor señala que son tres tipos de argumentos sustanciales con los que se desarrollan los indicadores de la vulnerabilidad: los deductivos, que se basan en la teoría existente, los inductivos, que se basan en los datos de las variables indicadoras y en el daño observado, y los normativos, que se basan en juicios de valor. En general, la evolución de los indicadores combina los diferentes tipos de argumentos.

Determinar con exactitud cuáles son los factores que inciden en la vulnerabilidad no es algo simple, se trata de una cualidad de un grupo humano, la que se deriva de una serie de relaciones complejas entre características demográficas, sociales, culturales, tecnológicas y económicas que determinan su capacidad de responder a situaciones adversas.

En un orden similar al de Hinkel, Magaña (2012) argumenta que no existe una metodología universalmente aceptada para cuantificar la vulnerabilidad futura que, en conjunto con proyecciones del clima, permita estimar el riesgo que se enfrentará bajo cambio climático. El autor indica que la aproximación al problema de establecer la vulnerabilidad debe transitar por tres preguntas básicas: ¿vulnerable a qué? ¿quién o qué es vulnerable? ¿por qué es vulnerable? En consecuencia, las variables y la métrica para la estimación de la vulnerabilidad de los diversos sistemas al cambio climático pueden diferir entre las investigaciones.

En síntesis, la vulnerabilidad no es una magnitud física cuantificable directamente; solamente puede inferirse e interpretarse cualitativamente, no obstante, se puede estimar

¹⁰ Un indicador es una función de variables observables; una variable sólo se convierte en un indicador cuando se asocia (por medio de una función) a otra variable. También es importante tener en cuenta que los indicadores a menudo tienen un comportamiento lineal y que generalmente se necesitan varias variables indicadoras para hacer operacional un concepto (Hinkel, 2011).

¹¹ Es un proceso que consiste en definir estrictamente variables en factores medibles. El proceso define conceptos difusos y les permite ser estimados empíricamente y cuantitativamente.

de manera cuantitativa a partir de la aplicación de la teoría de indicadores, la cual, en términos generales señala que es posible aproximarse a la cuantificación de un fenómeno complejo no observable de manera directa por medio de la medición de variables que sí son accesibles y que se consideren relacionadas con el fenómeno que se quiere conocer, de tal manera que una vez que se cuenta con los indicadores, sean incluidos en modelos para estimar la vulnerabilidad (Hinkel, 2011; Unidad Nacional de Emergencias Agrícolas y Gestión del Riesgo Agroclimático [UNEA]-FAO, 2011).

Los modelos utilizados para la estimación de la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas a riesgos climáticos, incluido el cambio climático, se distinguen en dos tipos, estructurales y espaciales (Ordaz *et al.*, 2010). Aquellos modelos con un enfoque estructural combinan las respuestas biofísicas de los cultivos con las respuestas económicas de los agricultores. En términos generales, primero se aproxima la respuesta de los cultivos ante escenarios de cambio climático (comúnmente para las variaciones en las temperaturas y precipitación) y una vez obtenidos los efectos estimados, se incorporan a través de modelos económicos del sector agrícola, simulaciones de cambios en la oferta de los cultivos y los precios del mercado. También se suelen incluir variables que indiquen algún grado de adaptación (Hernández *et al.*, 2014).

Por otra parte, los modelos con enfoque espacial buscan estimar los efectos del cambio climático en la agricultura con base en las diferencias observadas en los valores de la tierra, la producción agrícola y otros impactos climáticos relacionados entre regiones, utilizando métodos estadísticos o de programación para analizar los cambios en los patrones espaciales de la producción (Molua y Lambi, 2007). Una de las diferencias de este enfoque con el estructural es que los modelos espaciales asumen que los ajustes biológicos, físicos y económicos impuestos por el cambio climático a los cultivos y agricultores se realizarán de manera automática (Ordaz *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2014). A pesar de lo anterior, se suelen emplear ambos modelos por separado o en conjunto en distintas investigaciones (Liverman, 1990; Gay *et al.*, 2004; Monterroso *et al.*, 2007; Villers *et al.*, 2009; Länderach *et al.*, 2011; Magaña, 2012; Esperón *et al.*, 2015; Ortiz y Ortega, 2015; Schroth *et al.*, 2016; Álvarez *et al.*, 2017; y Craparo, 2017).

En el apartado siguiente de este capítulo se presentan los aspectos relacionados con el aguacate, su origen y domesticación, sus características, su fenología, las condiciones físicas favorables para su cultivo y la influencia de los elementos del clima en su

crecimiento y desarrollo que servirán de sustento para el análisis realizado en el segundo capítulo de la presente investigación.

1.6 El aguacate

El aguacate (*Persea americana*) es una especie perteneciente a la numerosa familia de las Lauráceas, cuyo nombre proviene del náhuatl y significa “testículos de árbol”. Se trata de una especie cultivada desde hace siglos en la región mesoamericana. Actualmente su producción se distribuye en países como México, República Dominicana, Colombia, Perú, Indonesia, España, Israel, Australia, entre otros, sin embargo, México es el que ha encabezado por largo tiempo la producción a nivel mundial. A pesar de lo anterior, existe un grado de incertidumbre en cuanto al comportamiento de la producción y rendimiento, lo cual ha incitado al estudio de la influencia de factores exógenos y endógenos en el rendimiento y producción del aguacate.

1.6.1 Origen y domesticación de la planta

De acuerdo con Jardón *et al.* (2011a), la distribución del género *Persea* en América ocuparía la paleodistribución de las Lauráceas que habrían abarcado Gondwana y Laurasia en el Cretácico temprano (144 - 94 millones de años), teniendo presencia en Norteamérica desde hace por lo menos 70 millones de años donde se tenían ambientes tropicales y subtropicales. Una vez en el continente, las plantas migraron hacia el sur, posiblemente como consecuencia de cambios drásticos en la temperatura; la distribución cubrió desde Alaska hasta California, y se plantea que los mecanismos tempranos de distribución hayan sido por el movimiento de los suelos, agua y la dispersión animal (Jardón *et al.*, 2011c).

En cuanto a la especie *Persea americana*, Galindo *et al.* (2013) indican que el aguacate se originó en el área que actualmente ocupa la Sierra Nevada en California hace alrededor de 50 millones de años. Posteriormente, debido al cambio de las condiciones climáticas frías y secas ocurridas durante la última glaciación (hace 15 000 años) en la Sierra Nevada, la especie se desplazó hacia el sur hasta llegar al Valle de Tehuacán que antes del 10 000 a.C. era más frío y húmedo que en la actualidad (Buckler *et al.*, 1998). Jardón *et al.* (2011c) mencionan que la dispersión llegó hasta Mesoamérica durante las fluctuaciones climáticas del Pleistoceno, proliferaron y se diversificaron en la gran variedad de hábitats presentes en la zona, por lo que las subespecies de *Persea* se

distribuyen desde el centro de México hasta Centroamérica, siendo la región que comprende Mesoamérica el centro de origen de *Persea americana*.

La diversidad de *P. americana* puede explicarse en términos de los cambios evolutivos que ha tenido la especie para adaptarse en diferentes condiciones como la estacionalidad, duración del día, hábitats y enfermedades, entre otros (Diamond, 2002). No obstante, su diversidad no sólo está relacionada con aspectos ecológicos, sino que también las diferentes culturas que habitaron la región de Mesoamérica contribuyeron con la generación de dicha diversidad (Jardón *et al.*, 2011c).

Se ha señalado que *P. americana* pudo haber sido domesticada en al menos tres ocasiones, a partir de poblaciones geográficamente distintas al progenitor de la especie, dando como resultado cada una de las tres variedades cultivadas (Chen *et al.*, 2009). Las evidencias arqueobotánicas, lingüísticas e históricas sugieren que la región de Mesoamérica es donde se inicia el proceso de domesticación (Jardón *et al.*, 2011c).

Como sugieren Galindo *et al.* (2013) la domesticación de la planta pudo haber sucedido en tres fases: la fase inicial comprendería su colecta en los bosques y la selección de los árboles con los mejores frutos para cosecharlos *in situ*; la segunda fase se relacionaría con un cambio en las condiciones del clima, durante esta fase los grupos humanos ya conocerían el proceso de germinación de las semillas y comenzaron a sembrarlo para conservar las plantas con los mejores frutos y preservarlos; por último, el cultivo y la selección son completamente intencionales, donde los árboles más valiosos son llevados a los hábitats más favorables donde se incrementaría la adaptación del árbol para usos específicos.

Ahora bien, las muestras indican que no necesariamente existió un solo centro de domesticación. La evidencia más antigua de *P. americana* se encontró en cuevas de Coxcatlán en el Valle de Tehuacán que datan de entre 5 000 y 8 000 años de antigüedad, sin embargo, se ha sugerido que fueron traídos de zonas más húmedas (Jardón *et al.*, 2011c). Jardón *et al.* (2011c) apuntan que los probables iniciadores de la domesticación del aguacate serían los mokayas, cultura antecesora a los olmecas que habitó lo que hoy es Chiapas y parte de Guatemala, y que estos heredarían a los olmecas y mayas dicho conocimiento, favoreciendo así la distribución de la domesticación hacia otras regiones como el centro y sur.

Cada una de las tres variedades botánicas cultivadas surgieron en distintas zonas de Mesoamérica, con características geográficas particulares y, a partir de su relación con los distintos grupos humanos, se lograría una diferenciación morfológica y ecológica que ahora permite reconocer tres ecotipos¹²: var. *drymifolia* (regiones montañosas de México, conocida como variedad mexicana), var. *guatemalensis* (tierras altas de Guatemala, conocida como variedad guatemalteca), var. *americana* Mill. (de tierras bajas de la costa de Guatemala y conocida como variedad antillana) (Jardón *et al.*, 2011c).

1.6.2 Características del aguacate

El aguacate es una especie que tiene tres grupos o razas principales¹³, conocidas como mexicana, guatemalteca y antillana; cada una posee características propias que les permiten la adaptación a variadas zonas, y que además son indicativas de algunas propiedades químicas y características físicas de los frutos como el color y sabor (Tabla 1) (Lucero y Navarro, 2013).

La hibridación entre razas ha dado como resultado distintas variedades así, se encuentran la variedad Hass (90 % guatemalteco, 10 % *drymifolia*), Fuerte (60% *drymifolia*, 40% guatemalteco), Bacon (patrón *drymifolia*), Edranol (50% guatemalteco, 50% *drymifolia*), Choquet (patrón antillano), entre otras. La variedad que durante las últimas décadas ha dominado la producción mundial es la Hass, que se trata de un híbrido con mayor presencia de la raza guatemalteca. La segunda variedad de importancia es la Fuerte, un híbrido entre la raza mexicana y guatemalteca; esta variedad se ha caracterizado por producciones bianuales y en ocasiones más bajas que otros cultivares (Calvert, 1993). Cabe aclarar que este comportamiento de producción bianual (que son conocidos como año “On”, de alta producción, y “Off”, baja producción) también está presente en otras variedades, incluida la Hass.

Al respecto, Calabrese (1992) señala que la alternancia de cosechas en el aguacate es de origen genético, similar a la que se observa en otras especies frutales, como el olivo, y parece estar relacionada con el nivel de carbohidratos acumulados en el tronco y ramas, lo que parece promover la diferenciación de las yemas florales. Bajo esta hipótesis, se

¹² Subpoblación genéticamente diferenciada que está restringida a un hábitat, ambiente o ecosistema específico definido.

¹³ Estas tres razas no son lo suficientemente diferentes como para recibir la categoría de especie, pero sí para considerarse como subespecie o variedades, además, la hibridación entre estas razas ocurre con relativa facilidad debido a que tienen un genoma muy similar y sus híbridos obtienen ventajas de adaptación climática como características agronómicas mejoradas (Campos *et al.*, 2008).

sugiere que la floración y el crecimiento de los frutos de aguacate utilizan grandes cantidades de carbohidratos, de modo que un déficit de éstos limitaría los procesos y darían lugar a un año de escasez productiva (Gandolfo, 2008).

Tabla 1. Comparación entre las tres razas de aguacate

Árbol	Raza		Mexicana	Guatemalteca	Antillana
Árbol	General	Adaptación climática	tierras altas de México	tierras altas de Guatemala	tierras bajas
		Tolerancia al clima	subtropical	subtropical	tropical
	Forma	Internudos	más largos	largos	más cortos
		Lentícelas en brotes	pronunciados	ausentes	ausentes
		Rugosidad corteza	menos	más	más
		Pubescencia madera	más	menos	menos
	Hoja	Tamaño	más pequeño	grande	más grande
		Color	verde	verde	verde pálido
		Color hoja nueva	verdoso	rojizo	verde amarillento
		Olor a anís	presente (normalmente)	ausente	ausente
Cerosidad envés		más	menos	menos	
Fruto	Flores	Época	temprana	tardía	temprana-intermedia
		Flor a madurez fruto	5-7 meses	10-18 meses	6-8 meses
		Persistencia perianto	mayor	menor	menor
	Pedúnculo	Longitud	corto	largo	corto
		Grosor	medio	grueso	delgado
		Forma	cilíndrico	cónico	cabeza de clavo
	Fruto	Tamaño	chico-medio	pequeño-grande	medio-muy grande
		Forma	mayoría elongado	mayoría redondo	variable
	Piel	Color	normalmente morada	negra o verde	verde pálido, castaño
		Superficie	revestido de cerosidad	asperosidad variable lustrosa	
Grosor		muy delgada	gruesa	medio	
Células pétreas		ausentes	presentes	muchas	
Flexibilidad		membranosa	rígida	cueruda	
Facilidad de pelado		no	variable	si	
Semilla	Relación al tamaño	grande	muchas veces pequeña	grande	
	Testa	delgada	normalmente delgada	gruesa	
	Separación cavidad	muchas veces holgada	pegada	mayormente holgada	
	Superficie	suave	suave	rugosa	
Pulpa	Sabor	anisada, sazónada	muchas veces rica	dulce, suave	
	Contenido de aceite	más alto	alto	bajo	
	Fibrosidad	común	menos común	intermedia	
Tolerancia a guardar en frío		más	más	menos	

Fuente: Adaptado de Gardiazabal (2004).

Por otra parte, Lovatt (2004) indica que el problema de la alternancia de las cosechas puede iniciarse bajo condiciones climáticas que producen una elevada abscisión de flores y/o frutos, dando origen a un año de baja producción y al año siguiente, aumentar la floración y con ello la cosecha. Por el contrario, condiciones climáticas óptimas para el cuajado producirán un año de elevada cosecha, que será seguido por un año de baja producción.

Además, como menciona Gandolfo (2008) el aguacate presenta de forma notoria este comportamiento alternante, pero se dispone de poca información respecto a la fisiología reproductiva de la especie para poder entender este proceso y la modulación que pueden

ejercer ciertas prácticas agronómicas y las condiciones climáticas. A lo anterior se debe agregar el errático y altamente dependiente de las condiciones climáticas mecanismo de cuajado, así como la existencia de una fecha clara de inducción floral que limita y hace más complicado encontrar una solución a la alternancia productiva. Asimismo, los factores como la baja fertilidad de los suelos, disponibilidad de nutrientes y agua para los árboles, presencia de heladas, granizo y vientos fuertes pueden ser limitantes de la producción. De manera paralela, la presencia de plagas como trips, araña roja y enfermedades como roña y antracnosis están ligados a factores climáticos como precipitación, humedad relativa, temperatura y a la fenología del cultivo que de igual manera restringen la producción (Coria, 2009).

1.6.3 Fenología del aguacate

Durante el ciclo de desarrollo del aguacate necesariamente transcurre con una brotación vegetativa y madurez de los folíolos, madurez y brotación de las yemas terminales y axilares, y en respuesta a las condiciones ambientales y a la fisiología interna, se produce la floración, con la consiguiente polinización y formación de frutos hasta la cosecha. Estos eventos suceden con regular periodicidad en las zonas mundiales productoras de aguacate, sin embargo, también pueden traslaparse, retrasarse, adelantarse, o incluso no presentarse, lo que dificulta su estudio y modelación, pero generalmente, la floración, cuaja y brotación son eventos que se desarrollan simultáneamente (Calvert, 1993; Coria, 2009).

Los flujos vegetativos, la floración y la formación del fruto son eventos fenológicos sustanciales para la planta de aguacate. Por lo general, la brotación vegetativa de inicio ocurre en dos meses. La floración, puede comenzar desde agosto y terminar en febrero, aun cuando puede haber periodos definidos de agosto y septiembre, de octubre a noviembre, de diciembre a enero, incluso de marzo a abril (Coria, 2009). El crecimiento del fruto ocurre dependiendo de la floración y la duración es en promedio de 8 meses.

Actualmente se sabe que en diversos climas se propician las condiciones para que los árboles de aguacate produzcan hasta tres flujos vegetativos, que corresponden al invierno, primavera y verano, pero es el que ocurre durante el invierno el de mayor intensidad e importancia para la producción de brotes florales (Rocha *et al.*, 2011). También se ha señalado que suceden hasta cuatro periodos de floración; estos flujos son conocidos como floración loca (agosto-septiembre), adelantada (octubre-diciembre), normal (diciembre-

febrero) y marceña (febrero-marzo), lo cual resulta en la presencia simultánea de frutos de diferentes edades en los árboles, situación que ha sido evaluada en México por Salazar *et al.* (2005); Cossio *et al.* (2008); Coria (2009); y Rocha *et al.* (2011). La temporada de floración dura aproximadamente dos meses, sin embargo, esta puede variar en función al ambiente; en climas más fríos, el periodo de floración se prolonga (Jardón *et al.*, 2011b).

Sin restar importancia a los otros procesos fisiológicos del aguacate, la floración es una etapa significativa ya que está relacionada con la producción de los frutos. La floración del aguacate es un evento complicado; un árbol en plena floración puede producir miles de flores, para finalmente cuajar sólo unos cientos de frutos. Como se ha mencionado antes, pueden suceder hasta cuatro flujos de floración, no obstante, la llamada floración normal es la que se presenta de manera más o menos constante en la mayoría de los árboles en los distintos climas donde se produce aguacate (Cossio *et al.*, 2008; Coria, 2009; Rocha *et al.*, 2011).

Ahora bien, las flores del árbol de aguacate son hermafroditas y no son compatibles debido a que la apertura del estigma floral y la liberación de anteras no son coincidentes en el tiempo, por lo que es necesaria la fecundación cruzada con otra flor (Arpaia *et al.*, 1991). La dicogamia que presentan las flores, es decir, la maduración en distintos momentos de las partes femeninas y masculinas de la flor, se relaciona con la apertura de las flores, y dependiendo de este comportamiento se clasifican en dos grupos: A y B.

En las variedades tipo A (como el aguacate Hass), las flores abren primero al estado femenino en la mañana (primera apertura) y luego en la tarde del segundo día lo hace al estado masculino. En las variedades tipo B (como el aguacate Fuerte), las flores abren en etapa femenina en la tarde y pasan a la etapa masculina a la mañana siguiente (Gardiazabal, 2004; Jardón *et al.*, 2011b). En función a la situación antes descrita, el aguacate se considera un caso especial llamado heterodicogamia, en el que dos genotipos diferentes presentan dicogamia sincrónica, es decir, mientras las flores de un individuo se encuentran en etapa femenina, las flores del otro se encuentran en etapa masculina (Alcaraz y Hormaza, 2011). Por lo anterior, se suele recomendar a los agricultores la siembra en un mismo lugar de ambas variedades para favorecer el entrecruzamiento y producción de frutos, de tal manera que es necesario mezclar variedades adaptadas a las condiciones ambientales locales, con tipo de floración A y B y con la misma época de floración en una proporción 4:1, donde la mayor población será la variedad deseada (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2012).

Cabe mencionar que, aunque la polinización cruzada parece ser una regla en el aguacate, se han observado tres mecanismos de reproducción en las plantaciones: la autogamia (polinización de las anteras hacia el estigma de la misma flor), geitonogamia (ocurre cuando el polen de una flor es depositado en el estigma de otra flor, pero del mismo árbol o cultivar) y la polinización cruzada (cuando el polen es transferido de las anteras hacia el estigma de flores en árboles diferentes y alejados uno de otro, principalmente transportado por vectores), siendo esta última la más regular (Jardón *et al.*, 2011).

Una vez que las flores han sido polinizadas y fertilizadas con éxito, comienza el proceso del crecimiento del fruto, el cual ocurre en tres fases: la primera incluye el desarrollo del ovario, fertilización y cuajado de fruto; en la segunda fase continúa la división celular, formación de semilla y desarrollo embrionario; en la tercera se da la elongación celular y maduración del embrión. La primera fase puede tomar alrededor de 10 semanas después del pico de floración, la fase de crecimiento lineal puede llegar hasta 30 semanas después de la floración, dependiendo de la variedad y condiciones ambientales, por último en la fase de maduración, el crecimiento se detiene (Cowan *et al.*, 2001; Scora *et al.*, 2002; Romero, 2012). Tal como lo han sugerido Calvert (1993); Cossio *et al.* (2008); Gardiazabal (2008); Coria (2009); y Rocha *et al.* (2011), el crecimiento del fruto en promedio dura 8 meses aunque también se ha visto que puede durar menos tiempo, entre cuatro y cinco meses (Reyes *et al.*, 2015).

Por otra parte, los frutos que no cuajan se dividen en dos grupos: aquellos que provienen de las flores polinizadas pero en las que no se alcanzó la fertilización, y los procedentes de flores polinizadas y fertilizadas que darán lugar a un embrión normal y semillado. Bajo condiciones ambientales favorables, los aguacates cuajan más frutos que los que el árbol es capaz de llevar hasta la madurez; en estas condiciones, la planta ajusta su capacidad de nutrir a los frutos modificando su número, es decir, provocando la caída de frutos recién cuajados durante las tres o cuatro primeras semanas. Cabe aclarar que el fruto del aguacate no madura en el árbol y se ha planteado la posibilidad de que una reducción en los niveles de azúcares sería un prerequisite para su maduración (Gandolfo, 2008).

1.6.4 Condiciones físicas favorables para el cultivo

Los tipos de climas a los que la planta se ha adaptado son cálidos, semicálidos, templados y semisecos (Coria, 2009; Campos, 2012; Ruiz *et al.*, 2013).

Las condiciones físicas donde el aguacate prospera son determinantes de acuerdo con la raza o variedad que se cultiva; se pueden establecer plantaciones desde el nivel del mar hasta los 3 000 msnm, aunque se consideran 2 400 msnm como límite de la altitud apropiada para una producción rentable (Coria, 2009).

Los requerimientos ambientales de las tres razas están relativamente bien definidos: la raza mexicana es la que soporta climas fríos y húmedos a condición de un buen drenaje del suelo; la raza antillana se encuentra a menos de 500 msnm, pero necesita mayor disponibilidad de agua (más de 1 800 mm anuales); y la raza guatemalteca, que es de climas semicálidos a cálidos, la precipitación óptima se encuentra por debajo de los 1 500 mm anuales. Para las tres razas, la humedad relativa debe ser alta durante la polinización, mientras que debe ser baja en la formación del fruto para evitar enfermedades ocasionadas por hongos (Ibar, 1983; Coria, 2009).

El tipo de suelo óptimo para las plantaciones de aguacate también difiere respecto de la raza. Los de la raza mexicana son altamente sensibles a la salinidad y a la clorosis férrica; mientras que los de la guatemalteca son más resistentes a las condiciones antes mencionadas; por último, los árboles de la raza antillana son más tolerantes a ambas condiciones; esta tolerancia a la salinidad es probable que se deba al hábitat de tierras bajas de donde provienen, sujetas a inundaciones periódicas con una alta carga salina (Gardiazabal, 2004).

Los suelos más favorables y sobre los cuales se localizan la mayor superficie ocupada por aguacate son andosoles y luvisoles, que de acuerdo con las características descritas por la FAO, los primeros son derivados de cenizas volcánicas recientes, muy ligeros y con alta capacidad de retención de agua y nutrientes, susceptibles a la erosión y fuertes fijadores de fósforo, mientras que los segundos, son de color rojo o claro, moderadamente ácidos, con susceptibilidad alta a la erosión (Coria, 2009). Lucero y Navarro (2013) indican que el cultivo prefiere suelos de textura media, bien drenados y con buena aireación, con un pH de 5.5 a 7.5, profundidad mayor a 1.5 metros, además, su cultivo demanda nitrógeno, fósforo y potasio, así como de elementos menores como magnesio, hierro y zinc.

1.6.5 Relación de la radiación solar con la planta

La intensidad y duración de la iluminación son factores determinantes de la floración, y es de amplio conocimiento que la floración y fructificación son menos abundantes que a plena exposición (Gandolfo, 2008). Ruiz *et al.* (2013) la consideran como una planta de

fotoperiodo corto. Por otra parte, Gandolfo (2008) cita a Buttrose y Alexander (1978) y a Gazit y Degani (2002) para enunciar que los aguacates son especies de día neutro o indiferentes en cuanto al fotoperiodo, ya que se ha visto que la variedad Fuerte, manteniendo temperaturas inductivas florece bajo días largos (15 h) y cortos (9 h), sin embargo, el tiempo de floración se acelera con regímenes de días cortos, asimismo, se ha observado que la inducción e iniciación de las yemas florales en la variedad Hass puede ocurrir en julio y agosto cuando la duración del día es mayor a las 12 h para producir la floración atípica denominada “floración loca” de septiembre.

1.6.6 Influencia de la temperatura en la fenología

La temperatura es el factor responsable de la transición de la etapa vegetativa a la reproductiva, la cual ocurre a final de la expansión de los tallos a finales de julio y principios de agosto. Actualmente se sabe que en los climas subtropicales los aguacates sólo pueden producir botones florales con presencia de temperaturas bajas (Jardón *et al.*, 2011b).

En general, se ha establecido que los límites de temperatura para el crecimiento y desarrollo del aguacate son de 10°C y 33°C, pero las exigencias de temperatura varían de acuerdo con la raza: para la mexicana la media óptima es de 20°C con una mínima invernal no inferior a -4°C; para la raza guatemalteca la media óptima oscila entre 22°C y 25°C, con una mínima invernal no inferior a 0°C (Ruiz *et al.*, 2013). Las temperaturas superiores a 33°C tienen un efecto sobre la polinización al causar la esterilización del polen, y a partir de los 42°C son consideradas como catastróficas para el cultivo (Ruiz *et al.*, 2013).

El mayor amarre de frutos de aguacate ocurre con temperaturas entre 20°C y 25°C, mientras que por encima de los 28°C se provoca la abscisión de flores individuales (Coria, 2009). La temperatura determina la producción y la época de cosecha en función de la variedad, y son las bajas temperaturas las limitantes tanto para el árbol como al fruto (Gardiazabal, 2004; Coria, 2009). Gardiazabal (2004) menciona que estas temperaturas pueden ocurrir en otoño, invierno e incluso a comienzo de la primavera, manifestándose en las llamadas heladas tardías.

La resistencia al frío depende de la raza y la edad del árbol, donde la raza mexicana es la que tiene una mayor tolerancia a las bajas temperaturas (Tabla 2) y en general, en cuanto más joven es el árbol, es más susceptible al frío. Ruiz *et al.* (2013) señalan que la mínima

letal para las razas mexicana, guatemalteca y antillana son -9°C , -6°C y -4°C respectivamente.

Tabla 2. Resistencia al frío del árbol de aguacate

Edad	Antillana	Guatemalteca	Mexicana
Joven	-1°C a -2°C	-2°C a -4°C	-3°C a -4°C
Adulta	-1°C a -4°C	-3°C a -5°C	-4°C a -7°C

Fuente: Gardiazabal (2004).

De igual manera, las variedades presentan una resistencia a las bajas temperaturas diferente (Tabla 3), donde la Hass es la más sensible a las heladas; se pueden presentar daños visibles cuando se exponen a temperaturas menores de -2.2°C por cuatro o más horas (Ruiz *et al.*, 2013).

Tabla 3. Resistencia al frío del aguacate por variedad

Variedad	Raza	Resistencia al frío
Hass	Mayormente guatemalteca	-1.1°C
Fuerte	Mexicana y guatemalteca	-2.7°C
Bacon	Mayormente mexicana	-4.4°C

Fuente: Gardiazabal (2004).

Las condiciones ideales de temperatura para el aguacate están en torno a los $25-30^{\circ}\text{C}$ para las diurnas y entre 15°C y 20°C para las nocturnas. Las temperaturas por encima de los 36°C causan serios daños, particularmente en la fecundación y el cuajado, siendo importante que ocurra un periodo de frío con temperaturas alrededor de 10°C en invierno para estimular la inducción floral (Galán, 1990; Gandolfo, 2008).

El ciclo floral también depende de la temperatura, donde las más sensibles son las que tienen un comportamiento tipo B que el A. Cuando la temperatura máxima del día cae por debajo de los 20°C y la temperatura mínima bajó a 15°C , se interrumpen los ciclos florales de las variedades tipo B y muchas flores sólo pueden abrir como masculinas. Las temperaturas óptimas para las variedades tipo B durante la floración son de 25°C como

máxima diaria y más de 10°C como mínima nocturna. Los cultivares tipo A se adaptan a máximas diarias de 20°C y mínimas nocturnas de 10°C (Calvert, 1993).

1.6.7 Disponibilidad de agua y aguacate

Los periodos más importantes de necesidades hídricas para no afectar la producción suceden durante los procesos de floración y cuajado del fruto en primavera y verano, donde la fruta está en los primeros estados de desarrollo (Gardiazabal, 2008). Coria (2009) y Lucero y Navarro (2013) sugieren que el árbol de aguacate requiere entre 500 y 1 000 mm de precipitación al año y que es importante que la planta disponga de agua suficiente desde el cuajado del fruto hasta su recolección, además ésta es sensible a encharcamientos que producen asfixia radicular y desarrollo de enfermedades, así como la caída de hojas y frutos. Ruiz *et al.* (2013) señalan que el aguacate requiere de una distribución más o menos uniforme de la precipitación; la cantidad requerida depende de la raza: para la mexicana entre 800 y 1 000 mm anuales mientras que para la guatemalteca y antillana entre 1 000 y 1 500. Por su parte, Lahav *et al.* (1992) citado por Campos (2012) indican que la mejor producción de aguacate se presenta cuando se combina una precipitación de 600 mm y una lámina de riego de 572 mm al año, por lo que el rango óptimo está alrededor de los 1 100 mm al año.

Para el caso de México, Tapia *et al.* (2006) determinaron el requerimiento de agua para el aguacate en distintos tipos de climas durante el periodo de estiaje (Tabla 4). Mientras que, Sánchez *et al.* (2001) sugieren que el árbol de aguacate en producción tiene un requerimiento de 3.2 mm por día y durante la temporada de enero a mayo requiere una suplementación de riego equivalente a una lámina de 480 mm.

Tabla 4. Necesidades hídricas del aguacate en tres tipos de climas

Clima	Localidad	Altitud	Dic-Ene	Feb-Mar	Abr-May	Total
(A)C(w ₂)(w)	Uruapan-Peribán	1600 - 1800	1.8 - 2.0	2.0 - 2.9	3.0 - 3.1	458.8
C(w ₂)(w)	Tancitaro-Zirosto	1900 - 2300	1.3 - 1.5	1.8 - 2.4	2.6 - 2.9	389.4
(A)C(w ₁)(w)	Tecario-Ziracua	1200 - 1600	2.0 - 2.5	2.4 - 3.2	3.5 - 3.9	530.1

Fuente: Tapia *et al.* (2006).

De presentarse el estrés hídrico, no induce la floración bajo un régimen no inductivo de altas temperaturas, pero la aumenta bajo un régimen inductivo de bajas temperaturas. Sin embargo, en este caso la floración se retrasa y sólo se presenta alrededor de un mes después de que ha cesado el estrés hídrico (Chaikiattiyos *et al.*, 1994).

Por otra parte, la humedad en el ambiente no debe superar el 60%, porque el exceso puede provocar enfermedades que afectan follaje, floración, polinización y desarrollo de frutos, mientras que un ambiente muy seco provoca la muerte del polen con efectos negativos sobre la fecundación y con ello la formación de menor número de frutos (Gardiazabal, 2008; Coria, 2009; Lucero y Navarro, 2013).

Capítulo 2. Zonificación agroclimática actual y bajo escenarios de cambio climático

2.1 Área de estudio

2.1.1. Medio físico

El estado de Puebla se localiza en las coordenadas extremas 20°50'24" al norte, 17°51'39" al sur, 99°04'14" al oeste y al este 96°43'. Colinda con Hidalgo y Veracruz al norte, Veracruz y Oaxaca al este, al sur con Oaxaca y Guerrero, y al oeste con Guerrero, Morelos, México, Tlaxcala e Hidalgo. La entidad tiene una superficie total de aproximadamente 33 919 km², conformada por 217 municipios y dividida en 7 regiones socioeconómicas: región I Sierra norte; región II Sierra nororiental; región III Serdán y Valles centrales; región IV Angelópolis; región V Valle de Atlixco y Matamoros; región VI Mixteca; y VII Tehuacán y Sierra (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFED], 2020).

Su territorio está determinado principalmente por la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal. Entre las cumbres más altas sobresalen el Pico de Orizaba o Citlaltépetl con 5 747 msnm, el Popocatepetl con 5 452 msnm, el Iztaccíhuatl con 5 286 msnm y la Malinche con 4 460 msnm. Al sur del territorio, la Sierra Madre de Oaxaca, con el nombre de Sierra Colorada, recorre la sierra Mixteca baja o poblana, cuyas elevaciones principales son la Sierra de Atenahuacán, Zapotitlán, el Lomerío y la Sierra de Tehuacán. La Sierra Madre del Golfo, de la que se desprende el Nudo Mixteco, corre de sur a norte paralela a la costa, entre la sierra de Tehuacán y una faja serrana que se forma entre el Pico de Orizaba y el Cofre de Perote. Existen también montañas aisladas como: Xaltomate, La Magdalena, Cerro Pinto, Cerro de Pizarro, Vigía Alta, Peñón del Rosario, Cerro del Eje, Nanahuatzin, Chichintepec, Macuila, El Zoapilli y Temezcalco. Entre los macizos montañosos se encuentran numerosos valles y amplias llanuras como las de Puebla, Tehuacán, San Martín Texmelucan y Atlixco.

En el estado de Puebla existen cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo Norte, Sistema Volcánico Transversal y Sierra Madre del Sur, de las cuales se desprenden nueve subprovincias fisiográficas: Carso Huasteco, Llanuras y Lomeríos, Chiconquiaco, Lagos y Volcanes de Anáhuac, Sierras del Sur de Puebla,

Cordillera Costera del Sur, Sierras y Valles Guerrerenses, Sierras Orientales y Sierras Centrales de Oaxaca (Tabla 5 y Figura 3).

Tabla 5. Provincias y subprovincias fisiográficas de Puebla

Provincias	Subprovincias	Superficie %
Sierra Madre Oriental	Carso Huasteco	13.90
Llanura Costera del Golfo Norte	Llanuras y Lomeríos	0.75
Sistema Volcánico Transversal	Chincoquiaco	2.65
	Lagos y Volcanes del Anáhuac	41.12
	Sierras del Sur De Puebla	25.48
Sierra Madre del Sur	Cordillera Costera del Sur	1.27
	Sierras y Valles Guerrerenses	1.13
	Sierras Orientales	7.06
	Sierras Centrales de Oaxaca	6.67

Fuente: INEGI (2017).

Las características climáticas promedio de la entidad son: temperatura media de 16°C y una precipitación anual de 800 mm; la estación de lluvias se inicia en mayo, se establece en junio y termina en octubre. Se distinguen principalmente cinco regiones climáticas (Figura 3). La parte central y sur presentan un clima templado subhúmedo con medias anuales de 850 milímetros de precipitación y 15° C de temperatura; en el suroeste el clima es cálido y semicálido, con medias anuales de 830 milímetros de precipitación y 22°C de temperatura; el norte, donde se tiene un clima cálido y semicálido, húmedo en ambos con precipitaciones de 2 250 milímetros y 22°C de temperatura; en la región sureste existen áreas en las que los climas son semisecos y la temperatura varía desde cálido hasta templado, las lluvias en promedio son de 550 milímetros y 22°C de temperatura; finalmente, la zona de los volcanes, en donde los climas varían de semifríos hasta muy fríos.

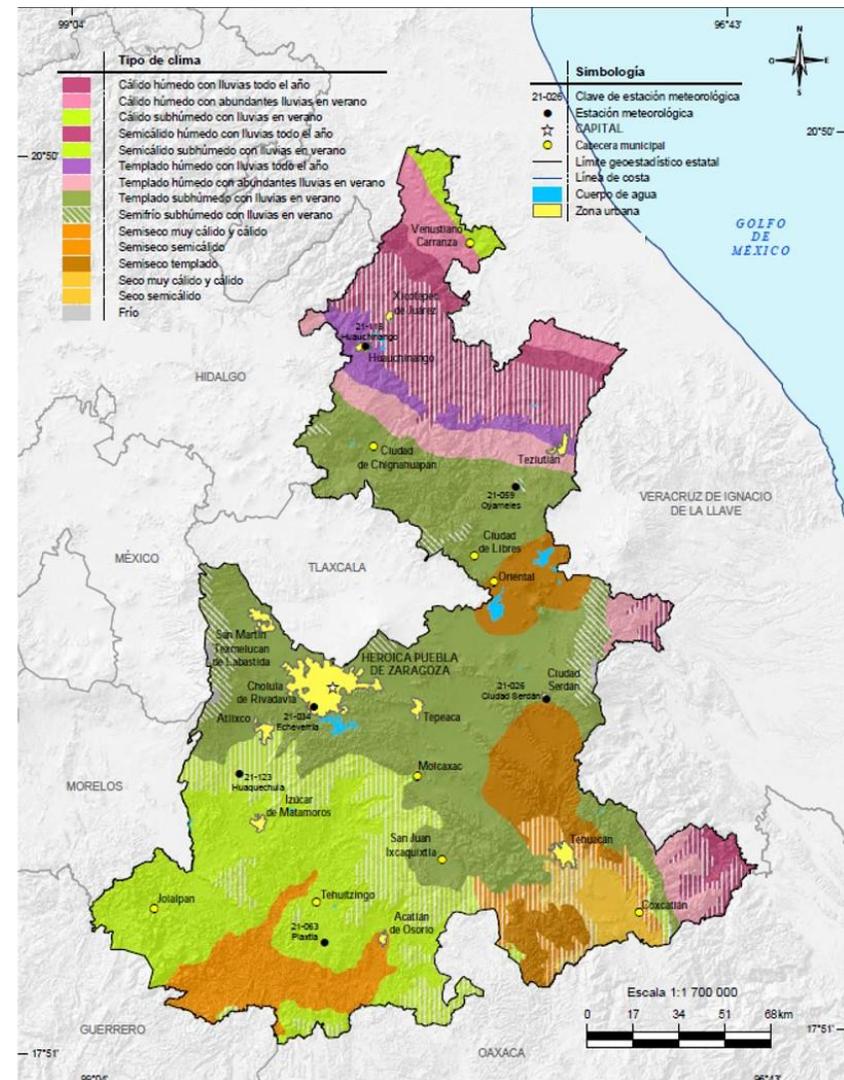
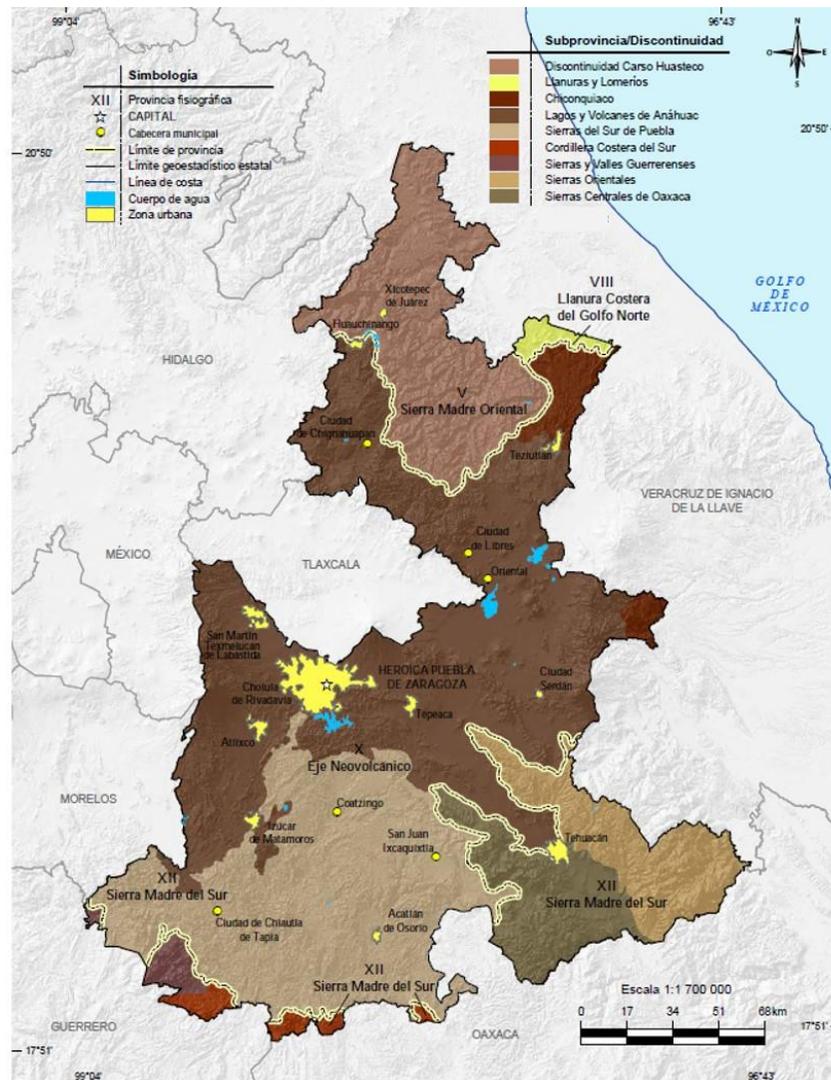


Figura 3. Provincias fisiográficas y tipos de climas en Puebla. Fuente: INEGI (2017).

El sistema hidrográfico está constituido por tres vertientes: interna, la del Golfo y la del Pacífico. Algunos de los ríos más importantes en la vertiente interna son: Tlapanalá, Valiente, Quetzolapa, Capulines, Cuautlapanga y Río Frío. A la vertiente del Golfo pertenecen los ríos: Pantepec, Cazones, Necaxa, Laxaxalpan, San Pedro, Zempoala, Apulco, Cedro Viejo, Salteros y Martínez de la Torre. La vertiente del Pacífico está formada por el río Atoyac, originado por los deshielos corrientes del Halos, Telapón, Papagayo, los del Iztaccíhuatl y los del río Zahuapan. En el Cañón del Diablo se forma la presa de Valsequillo o Manuel Ávila Camacho. También se tienen manantiales minerales como: Garcicrespo, Almoloya, San Lorenzo y Axocopan. Asimismo, entre las lagunas importantes podemos citar la de Chapulco, San Bernardino, Lagunas Epatlán, Ayutla, Almoloyan, Alchichica, Pahuatlán, Las Minas, Aljojuca, Tecuitlapa, Chiautla, Quechola y San Felipe Xochitlán. Por último, también se encuentran las presas hidroeléctricas de Necaxa y Mazatepec.

Los suelos presentes en la entidad pertenecen al tipo Acrisol, Andosol, Arenosol, Cheozem, Calcisol, Cambisol, Durisol, Fluvisol, Gypsisol, Kastañozem, Leptosol, Luvisol, Nitosol, Phaeozem, Regosol, Solonchak, Umbrisol y Vertisol (Figura 4).

En Puebla existe la vegetación de tres ecosistemas (Figura 4). El templado frío se ubica en las subprovincias Carso Huasteco, Chiconguiaco, Lagos y Volcanes de Anáhuac, Sierras Orientales y Sierras Centrales de Oaxaca; los tipos de vegetación presentes son pino, pino-encino, oyamel, entre otros. El ecosistema tropical (húmedo, subhúmedo y seco) se encuentra en las subprovincias Carso Huasteco, Chiconguiaco, Lagos y Volcanes de Anáhuac, Sur de Puebla, Cordillera Costera del Sur, Sierras y Valles Guerrerenses, Sierras Orientales, Sierras Centrales de Oaxaca y Mixteca Alta; algunos de los tipos de vegetación son: selvas altas y medianas, bosque mesófilo, palmar, selvas bajas y selva fragmentada. Los ecosistemas de zonas áridas se localizan en las subprovincias Lagos y Volcanes de Anáhuac, Sur de Puebla, Cordillera Costera del Sur, Sierras y Valles Guerrerenses, Sierras Orientales y Sierras Centrales de Oaxaca; los tipos de vegetación presentes son: Mezquital y Huizachal, Chaparral y Matorral xerófilo.

Por último, de acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], las áreas naturales protegidas (ANP en adelante) en Puebla son: Cañón del Río Blanco, Iztaccíhuatl-Popocatepetl, La Malinche o Matlalcuéyatl, Pico de Orizaba, Sierra de Huautla y Tehuacán-Cuicatlán.

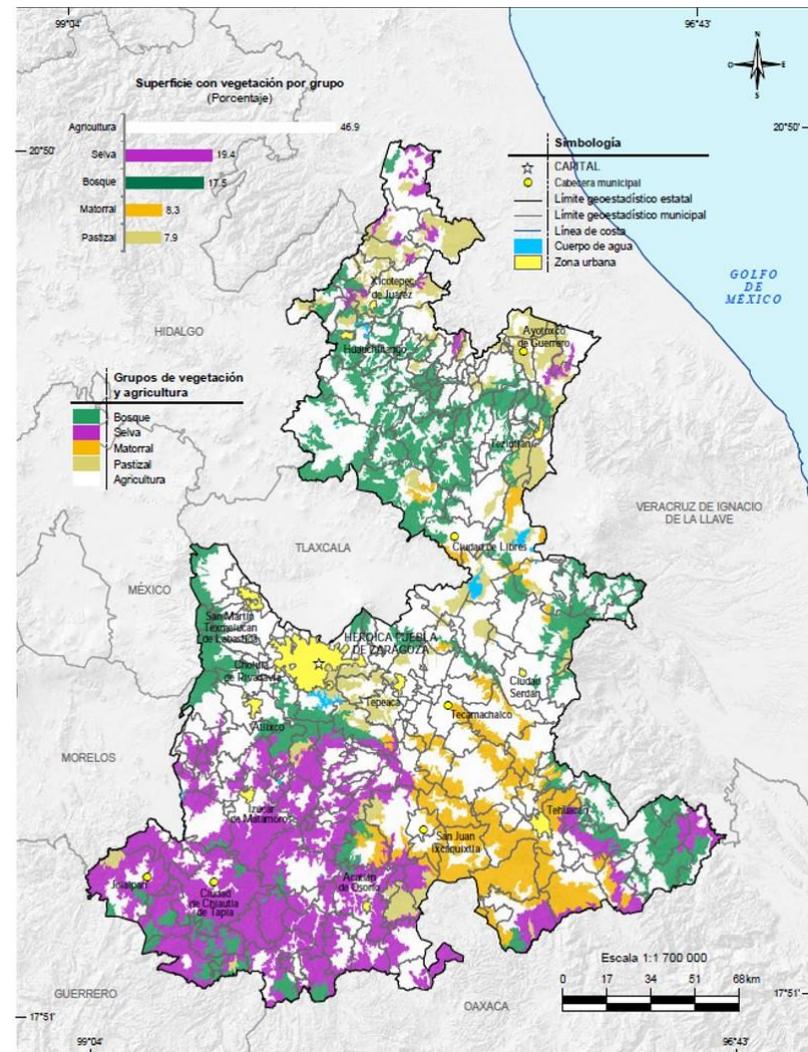
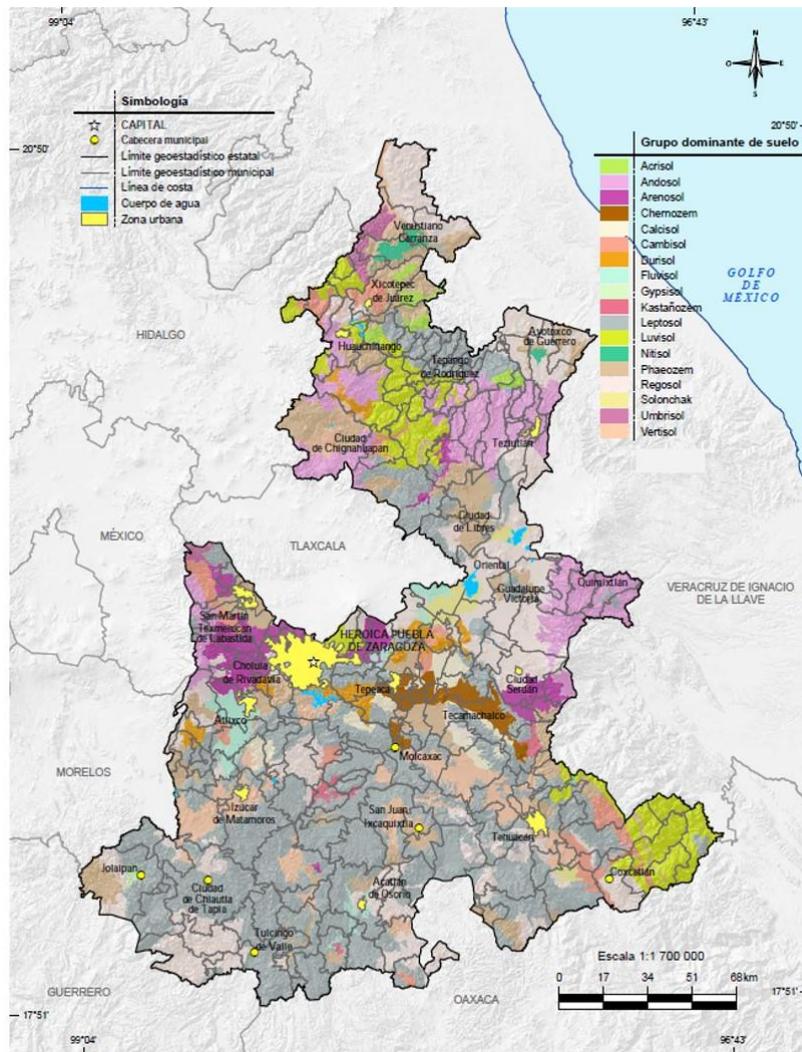


Figura 4. Tipos de suelos y vegetación en Puebla. Fuente: INEGI (2017).

2.1.2 Área productora de aguacate en Puebla

De acuerdo con los datos históricos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, de los 217 municipios, 49 son los que reportan producción de aguacate en Puebla. Sin embargo, el comportamiento de la superficie sembrada ha fluctuado con el tiempo. Para el periodo 2003-2018, los municipios con mayor superficie sembrada de aguacate en Puebla fueron: Quimixtlán, Tochmilco, Teziutlán, Atlixco, Chichiquila, Hueyapan, Tepexi de Rodríguez, Huaquechula y Zacapala. En cuanto al rendimiento, Izúcar de matamoros y Cuautinchán encabezan la lista de los municipios (Figura 5).

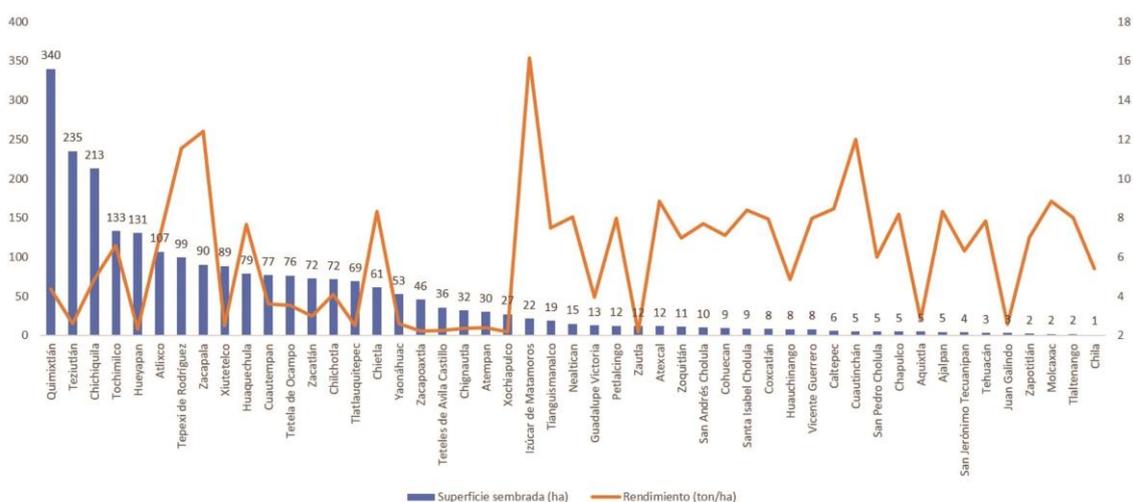


Figura 5. Superficie sembrada y rendimiento promedio por municipio. Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP (2019).

En la entidad no existe como tal un área productora reconocible, por lo que fue necesario identificar las regiones de producción donde las superficies sembradas y los rendimientos estuvieran por encima del promedio, lo cual en principio indicaría que ellas cuentan con las mejores condiciones ambientales para las plantaciones de aguacate. Para lo anterior, se realizó un análisis bivariado entre la superficie sembrada y el rendimiento promedio para el periodo 2003-2018 para clasificar en cuatro categorías o cuadrantes el conjunto de municipios.

Los datos fueron estandarizados, se calculó el coeficiente de variación y los resultados fueron graficados. La Figura 6 muestra la distribución de los datos, donde los puntos representan a los municipios presentados como sus puntuaciones típicas (*z scores*). Esta herramienta estadística permitió agrupar a los municipios bajo las siguientes condiciones:

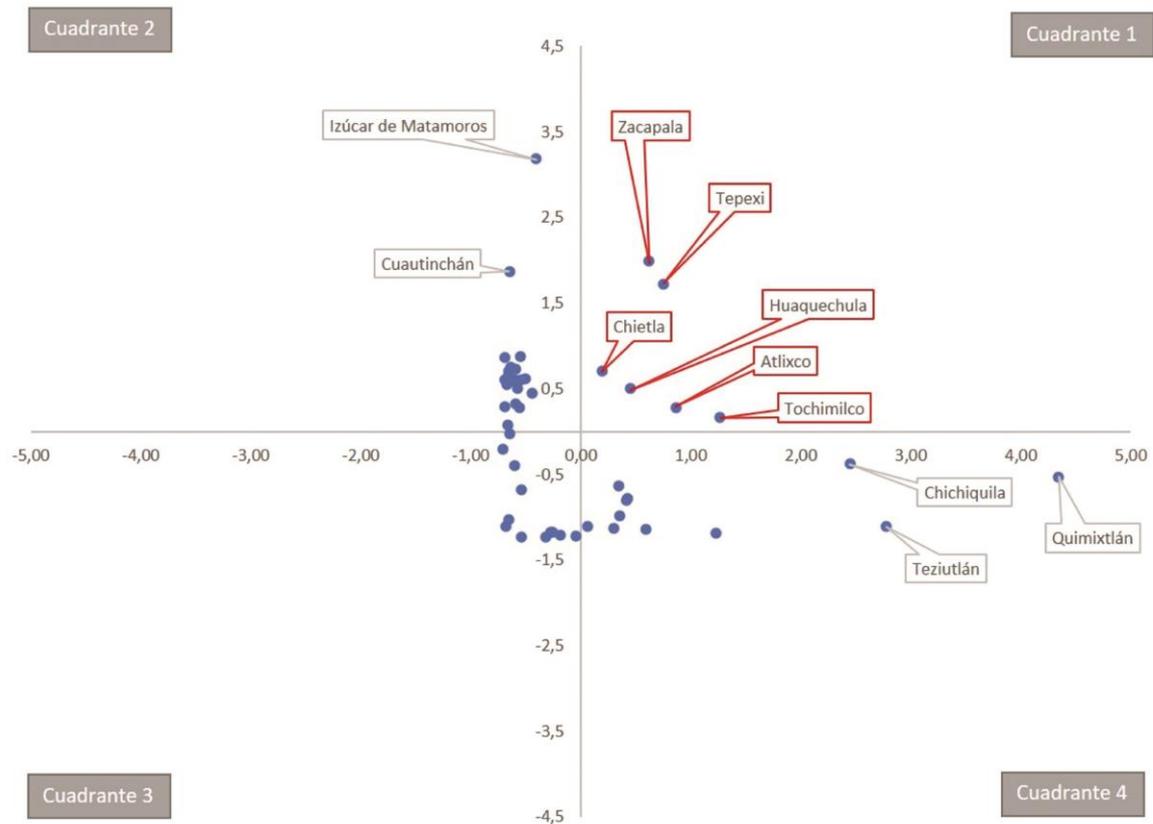


Figura 6. Distribución de municipios en ejes X, Y. Fuente elaboración propia con base en Segundo (2018).

Cuadrante 1: casos que superan la media estatal, tanto en superficie sembrada como en rendimiento

Cuadrante 2: casos inferiores al promedio en superficie sembrada pero con rendimientos superiores a la media

Cuadrante 3: casos por debajo de la media en ambas variables

Cuadrante 4: casos superiores en superficie sembrada pero bajos rendimientos.

Son seis los municipios que pertenecen al cuadrante 1, localizados en la parte oeste y centro-sur; mientras que 19 de ellos se encuentran en el cuadrante 2, distribuidos en su mayoría en la parte sur sureste y algunos más al oeste de la entidad; doce de los municipios son del cuadrante 3, ubicados sobre todo en el norte y este; por último, los 11 municipios productores restantes pertenecientes al cuadrante 4 de igual manera se distribuyen en el norte y este (Figura 7).

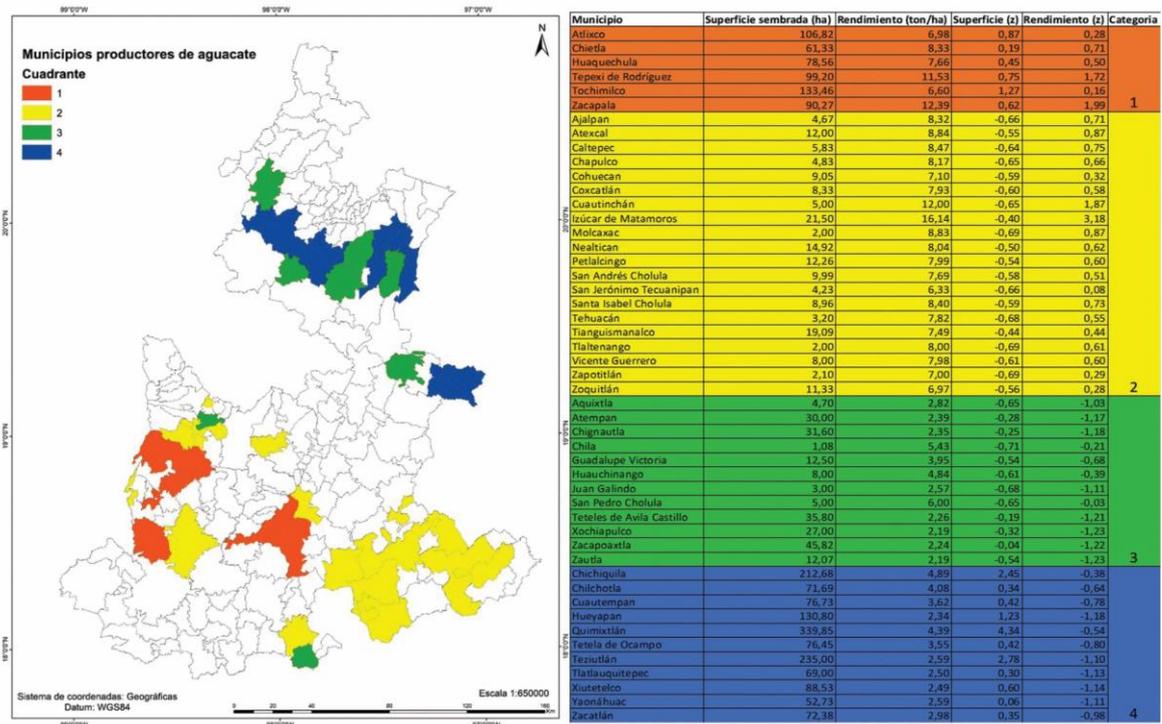


Figura 7. Municipios productores de aguacate y cuadrantes. Fuente: elaboración propia.

En función del análisis de estas dos variables sobresalen algunas regiones: al norte y este, donde la superficie sembrada y el rendimiento se encuentran por debajo de la media pero también donde hay más superficie pero menos rendimiento; el sureste, donde prácticamente los municipios productores tienen superficies menores a la media pero superiores en rendimiento; por último, al oeste y suroeste se distribuyen los municipios con valores superiores en la media para ambas variables pero también algunos de la categoría 2.

De esta manera se regionalizó a la entidad en función de los municipios productores con base en dos variables, sin embargo, surgió el siguiente cuestionamiento ¿las regiones con los mejores valores concuerdan con las áreas con condiciones agroclimáticas óptimas? situación que se analiza más adelante.

2.2 Obtención de datos

Los insumos necesarios para la zonificación del aguacate provienen de las variables que componen a la climatología de referencia cuya fuente son las bases de datos y metadatos de la Unidad Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales. Se decidió emplear estos archivos en formato ráster porque fueron generados a partir de las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional [SMN] que se encuentran en todo el

territorio mexicano, para un periodo de más de 30 años, a las que se les ha aplicado un control de calidad y además se les incorporó el efecto de la topografía para su interpolación; las variables corresponden a las temperaturas media, máxima y mínima, así como la precipitación a nivel mensual contenidas en píxeles de 900 x 900 m. Por otra parte, los datos de altitud se obtuvieron del Continuo de Elevaciones Mexicano del portal del INEGI. En cuanto a los datos de suelos se adquirieron del Conjunto de datos edafológicos. Escala 1: 1 000 000 de la misma fuente y se transformaron a formato ráster con una resolución igual a la de las variables climáticas.

Además se emplearon los datos de uso del suelo y vegetación del Conjunto de datos vectoriales. Uso del suelo y vegetación. Escala 1: 250 000, serie IV del INEGI y los valores de temperatura media, máxima, mínima y precipitación mensual de los escenarios de cambio climático, los cuales se descargaron en formato ráster de UNIATMOS con la misma resolución que la del escenario de referencia. Se consideró un escenario medio (RCP4.5), con tres modelos distintos bajo dos horizontes: futuro cercano (2015-2039) y futuro medio (2045-2069) para establecer coincidencias y contrastes. Por último, los datos fenológicos necesarios para llevar a cabo el método agroclimático provienen fundamentalmente de la revisión bibliográfica, así como de las visitas realizadas a 5 plantaciones en los municipios de Huaquechula y Atlixco. Durante estas visitas, se realizó un trabajo de campo exploratorio donde se aplicaron entrevistas semiestructuradas individuales a los productores de aguacate. Las preguntas se enfocaron en conocer las fechas en el año en la que sucedía la floración y especialmente, la importancia de las variables climáticas, de altitud y suelo para las plantaciones. Al no tratarse de una muestra significativa que reflejara las condiciones en toda la entidad poblana, los resultados solamente se compararon, analizaron y asociaron con las fuentes secundarias consultadas.

2.3 Toma de decisiones multicriterio y *Analytic Hierarchy Process*

Debido a que no todos los elementos ambientales influyen de la misma manera en la planta de aguacate, en su establecimiento, producción, rendimiento, etcétera, es preciso decidir y asignar un peso a aquellos que tienen mayor relevancia. El método de evaluación multicriterio, específicamente, los procesos analíticos ponderados (AHP, por sus siglas en inglés) son una herramienta ideal para la toma de decisiones y han sido empleados, en conjunto con los sistemas de información geográfica, en trabajos de un orden similar como el que aquí se expone (Vía, Muñoz y Martín, 2006; Aguilar *et al.*, 2010; Sahoo,

Dhar y Kar, 2016; Sotelo *et al.*, 2016; Achour *et al.*, 2017; Soplas *et al.*, 2018; y Guerrero *et al.*, 2019).

El paradigma de la toma de decisiones ha ido evolucionando y reorganizándose a medida que la complejidad de los problemas crece; desde sus inicios basados en la experiencia-intuición, seguido de la información-razonamiento hasta ser considerado en los últimos años como un binomio conocimiento-razonamiento (Moreno, 2002). La toma de decisiones multicriterio puede ser entendida como un conjunto de técnicas que sirven de apoyo para describir, ordenar, jerarquizar y evaluar con base en la comparación de los atributos que las distinguen, para la elección de la alternativa más adecuada.

De los distintos métodos de modelación multicriterio se encuentran los procesos analíticos jerarquizados introducido por Thomas L. Saaty a finales de la década de 1970, los cuales han tenido un gran impacto a nivel teórico y práctico. La idea fundamental del AHP es que la complejidad de una decisión se puede descomponer en un esquema jerárquico, donde el primer nivel corresponde a la meta, que es la declaración general que indica el propósito del análisis y los niveles subyacentes a los criterios, los cuales deben ser: completos, es decir, que consideren todos los puntos de vista del problema; operativos, que se puedan medir; no redundantes, dos o más criterios no deben medir lo mismo; y mínimos, que se deberán de considerar la menor cantidad de criterios posible (Moreno, 2002; Pacheco y Contreras, 2008).

Se ha partido de los métodos llevados a cabo por Aguilar *et al.* (2010) y Sotelo *et al.* (2016) pero en este caso se ha empleado el software SuperDecisions© para la ponderación de variables. La primera etapa consiste en la construcción del modelo de decisión, el cual se conforma por una meta, criterios y las relaciones entre ellas a partir de sus comparaciones por pares.

En este aspecto, la meta es encontrar las zonas con aptitud agroclimática en el área de estudio y los criterios corresponden a las variables ambientales (climáticas, fisiográficas y de suelo) que condicionan la aptitud (Figura 8).

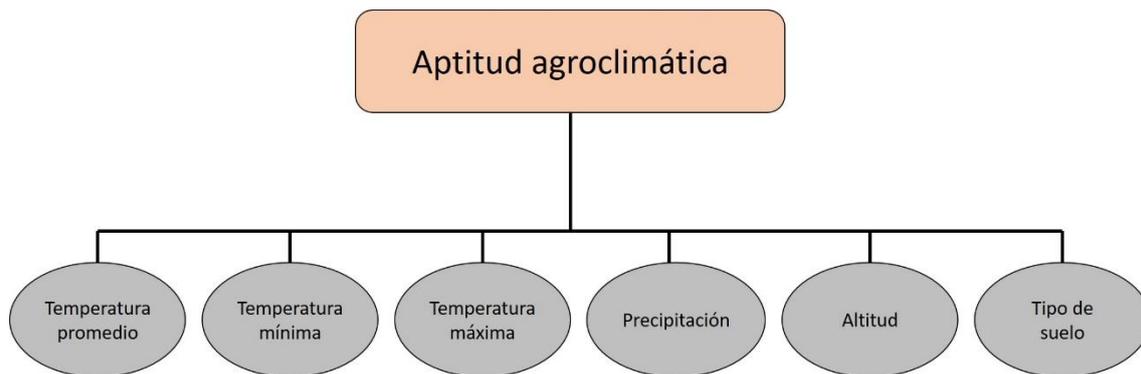


Figura 8. Modelo de decisión simplificado. Fuente: elaboración propia.

Una vez que se tiene el modelo de decisión, el siguiente paso es realizar la comparación por pares; para ello, es necesario contar antes con información que fundamente la decisión que se tome acerca de los criterios. En este caso, proviene principalmente de la búsqueda bibliográfica, seguida de la consulta a expertos en aguacate, tanto investigadores como productores. A partir de ello, se establecieron las variables en el siguiente orden de relevancia:

Primero, la precipitación y temperatura mínima, porque son las principales limitantes climáticas para el aguacate; el exceso o déficit hídrico repercute en el desarrollo y crecimiento vegetativo del árbol, así como la polinización y la formación de frutos, mientras que las bajas temperaturas causan daños a los órganos más tiernos como las flores, brotes y pequeños frutos, incluso pueden dañar permanentemente al árbol si se mantienen temperaturas por debajo de los 0°C. En seguida, la temperatura máxima, porque si se presentan temperaturas máximas muy altas y constantes, altera a las etapas de floración y principalmente la de fructificación. Después siguieron las variables que tienen una menor influencia para la aptitud, como la altitud y la temperatura promedio, que funcionan como parámetros indicativos para la inclusión de las mejores variedades para las plantaciones, por ejemplo, la antillana está adaptada a menos de 500 msnm con temperatura promedio de 24°C. Por último los suelos, debido a que se considera al aguacate como una planta que se adapta a gran diversidad de suelos en función de la raza o variedad (ver apartado 1.6 del Capítulo 1).

Los criterios en cada nivel se comparan por pares a partir de una matriz y una escala numérica que corresponden a expresiones verbales (Tabla 6). Básicamente lo que se hace es definir la importancia de cada criterio sobre otro (p.e.: qué tan importante es la

temperatura mínima sobre la altitud) para que al terminar, la matriz de comparaciones pareadas sea sometida a operaciones de álgebra de matrices y se obtengan los pesos.

Tabla 6. Correspondencia de expresiones verbales

Importancia o preferencia	Valor cardinal
Igual	1
Moderada	3
Fuerte	5
Muy fuerte	7
Extremadamente fuerte	9

Los pesos finales obtenidos del proceso antes descrito se muestran en la Tabla 7 y fueron empleados en la etapa siguiente de la zonificación que se detalla más adelante.

Tabla 7. Ponderación de variables

Variable	Peso (AHP)
Precipitación	0.331407520168028
Temperatura mínima	0.321795881931135
Temperatura máxima	0.173812866891492
Altitud	0.083145523774703
Temperatura promedio	0.053132830877709
Suelos	0.036705376356932
Inconsistencia	0.0498

Fuente: elaboración propia

Para examinar la coherencia lógica de las comparaciones, el AHP a través del software SuperDecisions, provee un mecanismo de índice de consistencia, cuyo valor debe ser menor a 0.1; mientras más se aleje de esta cifra, los resultados son más consistentes, tal y como ha sucedido con los datos de esta investigación.

2.4 Zonificación agroclimática del aguacate en Puebla

La zonificación se llevó a cabo en un sistema de información geográfica con los archivos de las variables en formato ráster a la misma resolución espacial; para el caso de la variable suelos, una variable discreta, fue necesario reclasificar los valores en función de la aptitud para el cultivo.

Una vez realizado lo anterior, se obtuvieron los valores máximos y mínimos de cada criterio desde los archivos ráster (Tabla 8) y se ajustaron las variables a una función de valor para tener una escala de medición común; el comportamiento de las variables podía

ajustarse a funciones tales como: cóncavo creciente, convexa creciente, campana, campana inversa, cóncavo decreciente y convexo decreciente. Para determinar dicho ajuste se establecieron los parámetros de idoneidad agroclimática para el aguacate con base en diversos estudios (Gardiazabal, 2004; Gandolfo, 2008; Gardiazabal, 2008; Alcantar, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2010; Alcántar y Muñoz, 2012; Romero, 2012; Ruiz *et al.*, 2013; Sarmiento, 2018; Zapata *et al.*, 2018) (Tabla 9).

Tabla 8. Valores mínimos y máximos

Valores	Precipitación	T. mínima	T. promedio	T. máxima	Altitud
Mínimo	225	-7.14167	-2.233333	2.675	8
Máximo	3909	20.05	25.95	34.958332	5608

Tabla 9. Parámetros que condicionan la aptitud

Descripción	Pp (mm)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	Tmax (°C)	Altitud (msnm)
No apta	>2400	<8	<12	>30	>2500
Poco apta	<650	>14	12 -16	<21	8 - 700
Media	650-1199	12 - 14	16 – 18	26 -30	700 - 1000
Apta	1600-2400	10 -12	20 - 25	21 - 24	1000-1600
Óptima	1200 – 1600	8-10	18 -20	24 - 26	1600-2500

Fuente: elaboración propia

La categoría óptima contiene las mejores condiciones para el aguacate; la apta implica condiciones climáticas favorables para las plantaciones, pero no tanto como las óptimas, debido a que hay más precipitación y si no se tiene un buen drenaje podría ser perjudicial; la aptitud media tiene más limitantes para el aguacate, por un lado, se corre el riesgo del déficit hídrico y el gasto en sistemas de riego, a pesar de que las temperaturas promedio y mínimas son moderadas, las máximas si serían más altas y se tiene el riesgo de que afecte a etapas clave como la floración y fructificación. En tanto, la poco apta implica principalmente un déficit hídrico e incluye aquellos sitios donde las temperaturas mínimas son mayores, además de áreas planas que pueden estar asociadas a valles; por último, la no apta tiene problemas de exceso hídrico, áreas con los extremos de temperaturas: las mínimas más bajas y las máximas más altas, y la mayor altitud para el cultivo.

Posteriormente, se empleó una hoja de cálculo con las fórmulas y gráficos correspondientes a las diferentes funciones de valor donde se introdujeron los parámetros necesarios para el cálculo. Las cinco variables se ajustaron a la función de campana, es

decir, el comportamiento de las variables, con respecto a la aptitud, en parte son crecientes y decrecientes, además de presentarse un punto en el que cambia la tendencia (Figura 9).

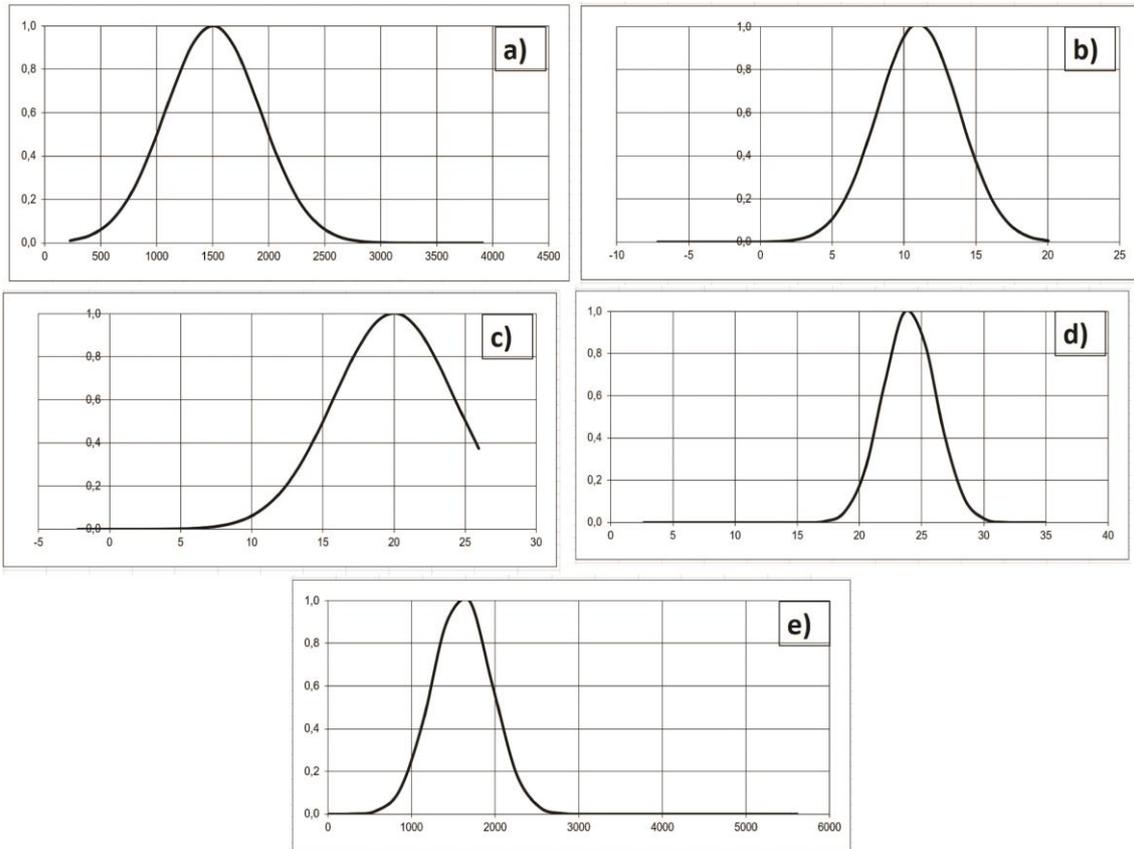


Figura 9. Funciones de valor: a) precipitación; b) temperatura mínima; c) temperatura promedio; d) temperatura máxima; e) altitud. Fuente: elaboración propia.

La fórmula 1 corresponde a la función de valor con forma de campana:

$$v = \frac{e^{-\left(\frac{x-x_{\max}}{\alpha}\right)^2} - y^-}{y^* - y^-} \quad (1)$$

Donde:

X: los valores de la capa de entrada (ráster)

X_{max}: el valor en las abscisas donde se alcanza el valor máximo (Tabla 10)

α: la amplitud, o la anchura de la campana

y⁻: valor mínimo

y^{*}: valor máximo

Tabla 10. Valores de Xmax y amplitud para cada variable

Valores	Prec	Tmin	Tmed	Tmax	Altitud
Xmax	1500	11	20	24	1600
Amplitud	600	4	6	3	500

El siguiente paso consistió en aplicar la misma fórmula pero en el sistema de información geográfica para que cada celda del ráster contuviera el valor asociado a la variable ajustada y normalizada y así ponderarla, es decir, multiplicarla por los pesos que se obtuvieron mediante el modelo AHP (ver Tabla 7). Como se ha mencionado al inicio de este punto, la variable suelos fue reclasificada en función de la aptitud, con base en la literatura, asignado valores de 0 (no apta) a 1 (apta), posteriormente se transformó en ráster y únicamente se multiplicó por su peso. Por último, se sumaron las coberturas ráster y se reclasificaron los valores en cinco condiciones para obtener la cobertura de aptitud (Figura 10).

2.4.1 Zonificación actual

La superficie que cuenta con aptitud de óptima a media en el territorio poblano supera el 50% (Tabla 11). Se pueden identificar dos grandes franjas con las mejores condiciones ambientales para las plantaciones de aguacate; la primera de ellas al norte, dentro de la provincia fisiográfica Carso Huasteco, con una dirección noroeste-este y donde se tienen climas C(w2), C(f) y (A)C(fm); la segunda, más extensa, pero en su mayoría bajo la categoría apta comienza en la parte oeste-sur-oeste dentro de la provincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac y continúa su recorrido hacia el sureste en las Sierras Orientales; los tipos de climas en los que se distribuye esta franja son variados, entre ellos se encuentran (A)C(w1), C(w1), C(w2), BS1kw, BS1hw, C(wo), C(w2), (A)C(m) y C(m).

Tabla 11. Superficie total de aptitud en Puebla

Categoría	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Óptima	184 999	5.5
Apta	826 773	24.6
Media	696 320	20.7
Baja	883 885	26.3
No apta	771 947	22.9

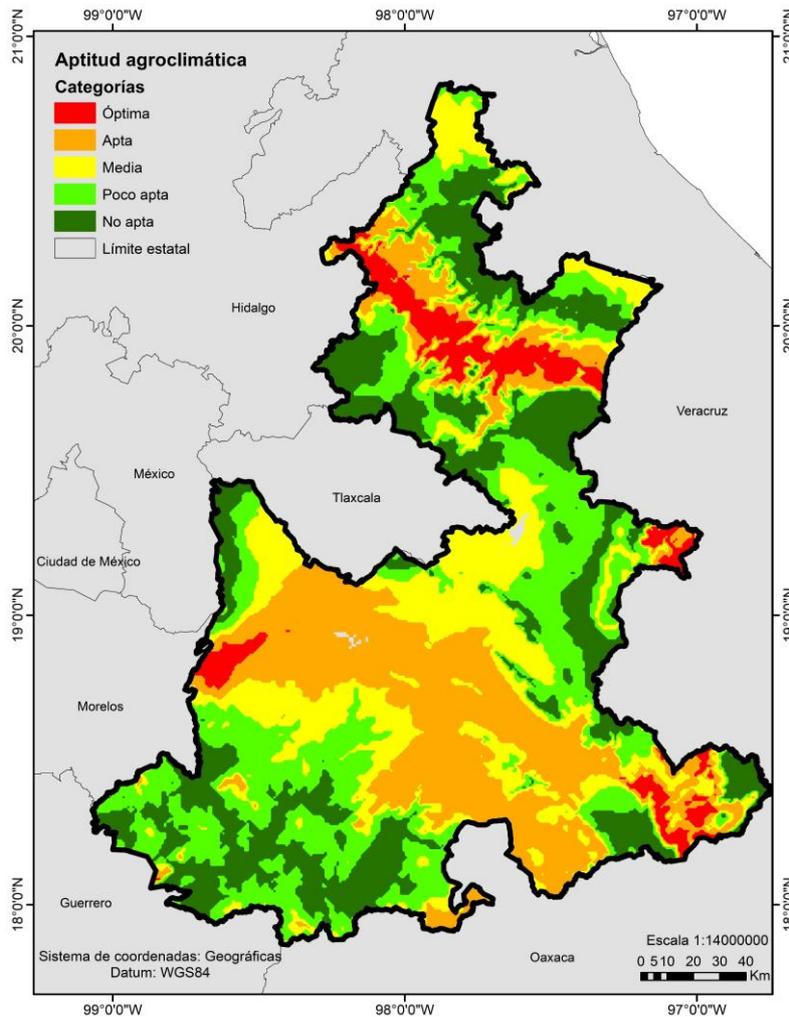


Figura 10. Aptitud agroclimática para el aguacate en el estado de Puebla. Fuente: elaboración propia.

Para una mejor gestión del territorio orientado a la planificación agrícola, se decidió emplear los límites político-administrativos municipales y calcular el porcentaje de aptitud con base en la totalidad del territorio de cada uno (Figura 11 y Anexo 1). Los municipios que tienen el mayor porcentaje de aptitud óptima son Teteles de Ávila Castillo, Cuautempan, Xochiapulco, Tepetzintla, Ahuacatlán, Chichiquila y Atzitzihuacán, localizados en su mayoría en la parte norte. Mientras que aquellos con una aptitud por debajo de la óptima se distribuyen principalmente en el centro de la entidad; Atoyatempan, Juan C. Bonilla, Coyotepec e Ixcaquixtla tienen un alto porcentaje con condiciones aptas. Los municipios con aptitud media tienen una distribución más irregular que en las categorías anteriores, sin embargo, es cierto que se concentran en la parte centro y oeste de la entidad; municipios como Rafael Lara Grajales, Domingo Arenas y San Martín Totoltepec, Xochiltepec, San Martín Texmelucan y Acatzingo son ejemplo de ello.

En cuanto a los municipios con poca aptitud se localizan hacia el este y suroeste; Atzala, Aljojuca, Chinantla y San Juan Atenco sobresalen en esta categoría. Por último, las zonas no aptas para las plantaciones se ubican en la parte norte y este de la provincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac, al norte de la provincia del Carso Huasteco y la mayoría de ellos en la parte suroeste de la entidad, en las Sierras del Sur de Puebla, Sierras y Valles Guerrerenses y la Cordillera Costera del Sur; municipios como Guadalupe, Caxhuacan, Hermenegildo Galeana o Jopala tienen la mayor parte de su territorio no apta para el aguacate.

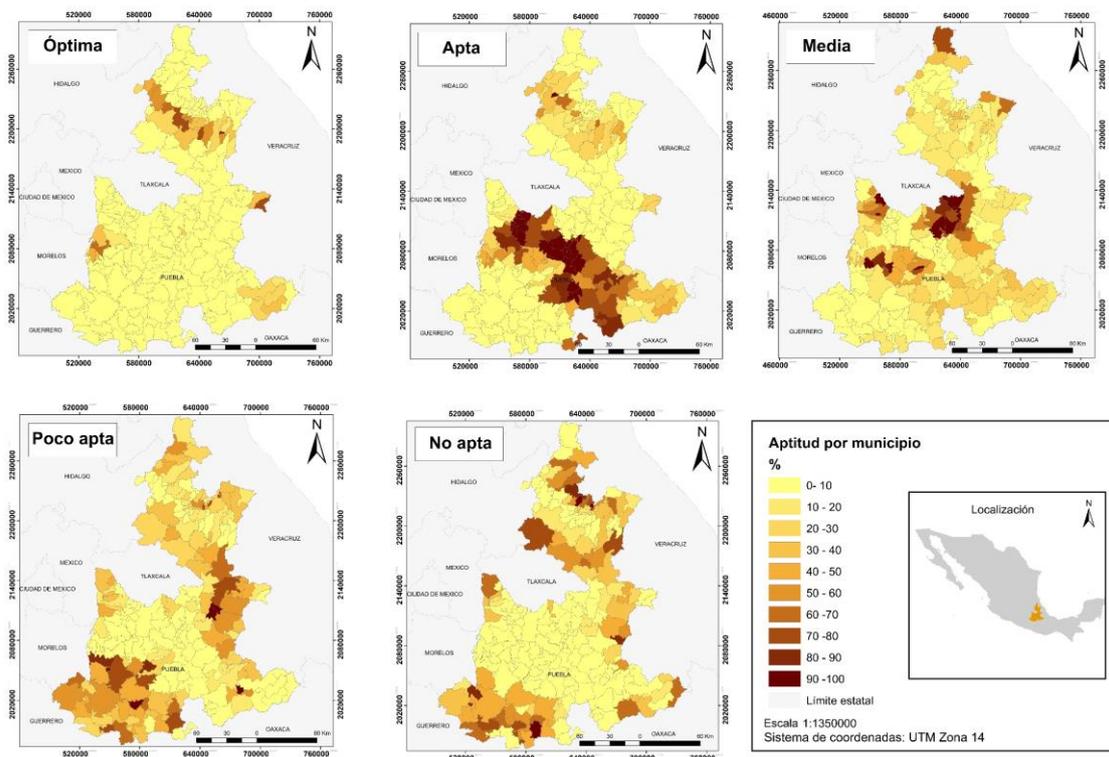


Figura 11. Porcentaje de aptitud por municipio. Fuente: elaboración propia.

Una de las interrogantes es si las regiones con los mejores valores de superficie sembrada y rendimiento (ver Figura 7) coinciden con las áreas con las principales condiciones agroclimáticas. Para resolver esta cuestión, se emplearon los valores porcentuales de aptitud por municipio y la categoría del cuadrante al que pertenecen.

En general, se puede afirmar que las regiones al oeste, suroeste y sureste son las que presentan una coincidencia entre los criterios agrícolas y ambientales, mientras que en las regiones del norte y este discrepan, ya que se distribuyen zonas importantes con las mejores condiciones de aptitud, pero los datos agrícolas indican lo contrario.

De los seis municipios que presentan valores de superficie sembrada y rendimiento por encima del promedio, Chietla es quien tiene menos porcentaje de aptitud para el aguacate, al presentar el 45% de su territorio bajo la categoría no apta; Zacapala concentra el mayor porcentaje en la categoría media y el resto en la apta y poco apta; los territorios de Huaquechula y Tepexi de Rodríguez tienen altos porcentajes en la categoría apta; por último, Atlixco y Tochimilco presentan en gran parte de su territorio las mejores características para las plantaciones (Tabla 12).

Tabla 12. Porcentaje de aptitud para los municipios del cuadrante 1

Municipio	Óptima	Apta	Media	Poco apta	No apta
Atlixco	11%	85%	3%	1%	0%
Chietla*	0%	5%	3%	43%	45%
Huaquechula	0%	58%	35%	7%	0%
Tepexi de Rodríguez	0%	84%	15%	1%	0%
Tochimilco*	31%	23%	13%	18%	9%
Zacapala	0%	27%	46%	27%	0%

*Los porcentajes no suman el 100% debido a la pérdida de información de los píxeles en la periferia de los límites municipales.

Los municipios con buen rendimiento pero superficie sembrada por debajo del promedio, no presentan condiciones óptimas, sin embargo, San Andrés Cholula, San Jerónimo Tecuanipan, Santa Isabel Cholula, Molcaxac y Tlaltenango tienen prácticamente la totalidad de su territorio bajo la categoría apta, seguido de Caltepec (86%), Cuautinchán (85%), Atexcal (75%), Zapotitlán (74%) y Tianguismanalco (70%). Mientras que Tehuacán (68%) y Nealtican (58%) también contienen un porcentaje considerable de aptitud. Por otra parte, Ajalpán, Cohuecán, Chapulco, Vicente Guerrero, Coxcatlán, y Zoquitlán disponen en su territorio todas las categorías, pero también estos dos últimos presentan porcentajes altos de no aptitud. En tanto, Izúcar de Matamoros cuenta con 20% de su territorio con aptitud media y el 76% poco apta, no obstante tiene rendimientos aceptables. Petlalcingo es el municipio con menor aptitud al tener tan sólo el 14% con categoría media.

Una situación que llama la atención es la que ocurre en los municipios con superficie sembrada por encima del promedio, bajos rendimientos y su relación con la aptitud. De

los diez municipios productores con esta condición, prácticamente todos cuentan con algún porcentaje de aptitud óptima para el aguacate, siendo Cuautempan (80%) y Chichiquila (70%) los que encabezan la lista; le siguen Teziutlán que en suma con las categorías óptima, apta y media tiene el 94% de aptitud, Quimixtlán con 82% del total, Tetela de Ocampo con 69%. En Yaonáhuac y Hueyapan existen entre 30% y 44% respectivamente con buena aptitud, que si se suman las categorías óptima y media resultan en más del 80% de sus territorios favorables para las plantaciones. Por otra parte, Tlatlauquitepec y Zacatlán tienen una distribución más equilibrada en cuanto a las categorías de aptitud; disponen con poco más del 50% de su superficie con condiciones propicias. Por último, Chilchotla y Xiutetelco son los municipios donde la mayoría de su territorio se encuentra con condiciones menos favorables para el aguacate. A excepción de Chilchotla y Chichiquila, el resto se localiza en la parte norte del estado, es decir, donde se distribuye una franja importante de aptitud para el cultivo, no obstante, los rendimientos suelen ser por debajo de la media por lo que sería pertinente identificar si las plantaciones se encuentran al interior de las zonas con mejor aptitud o bien, si están dentro, reconocer los otros factores que inciden en el rendimiento de las plantaciones.

Finalmente, están aquellos municipios productores cuyas superficies y rendimientos son por debajo del promedio, pero existen condiciones favorables. Teteles de Ávila Castillo (100%) y Xochiapulco (79%) cuentan con la mayoría de su superficie óptima para el aguacate, Huauchinango, Atempan y Zacapoaxtla presentan poco más del 50% de su territorio con la misma categoría. San Pedro Cholula y Juan Galindo tienen casi la totalidad apta para el cultivo, mientras que Chila y Zautla tienen entre 30% y 60% para la misma categoría. Por último, los municipios productores que presentan superficies y rendimientos por debajo del promedio y además poca o nula aptitud para el aguacate son Aquixtla, Chignautla y Guadalupe Victoria.

2.5 Limitantes para las plantaciones

2.5.1. Uso del suelo prioritario

Debido a la similitud de los requerimientos ambientales (clima, suelo, altitud) entre el aguacate y las especies arbóreas pertenecientes principalmente al bosque templado, surge la necesidad de reconocer la yuxtaposición entre las áreas de aptitud potencial con la vegetación prioritaria porque ello permitiría evitar el cambio de uso del suelo y los problemas que ello implica como: deforestación o fragmentación de esos espacios,

pérdida de servicios ambientales, incremento en los sistemas de monocultivo, uso de agroquímicos y consumo de agua tal y como se ha abordado en diversas investigaciones (Bravo *et al.*, 2009; Garibay y Bocco, 2011; Barsimantov y Navia, 2012; Chávez *et al.*, 2012; De la Tejera *et al.*, 2012; Segundo Vivanco, 2018; Ortiz e Infante, 2018; Villanueva y Zepeda, 2018; Méndez, 2019; Cho, 2020).

Por lo anterior, se decidió incluir como un parámetro importante el uso del suelo prioritario, compuesto por: 1) la superficie de las áreas naturales protegidas, y 2) todos los tipos de bosques presentes en la entidad y la vegetación secundaria arbórea de cada uno. El término prioritario hace alusión principalmente a los servicios ambientales que brindan como el control del ciclo hidrológico, regulación del clima, generación y conservación de suelos, entre otros y que se pretenden mantener. Estos servicios son considerados fundamentales para la mitigación del cambio climático. Además, se incluyeron los cuerpos de agua y áreas urbanas provenientes del archivo en formato vectorial Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI del INEGI para descartar dichas áreas.

Se realizó una sobreposición de coberturas vectoriales en un sistema de información geográfica entre el uso del suelo prioritario y la aptitud, tomando en cuenta únicamente aquella con vocación para las plantaciones, es decir, las categorías óptima, apta y media con el fin de calcular el área que se sobrepone con el uso del suelo prioritario y obtener así la categoría a la que llamaremos potencial sostenible. El término sostenible en este contexto indica que en las áreas con las mejores condiciones ambientales, las plantaciones de aguacate no dependan de otros factores para su éxito comercial (p.e.: implementación de sistemas de riego, fertilización de suelos, entre otros) y a la vez no comprometen un cambio de uso del suelo forestal a agrícola.

Nuevamente se realizó el análisis a nivel municipal por categoría. Para determinar los municipios con mayor potencial sostenible se seleccionaron aquellos que tuvieran superficie con condiciones para las plantaciones (desde 1 hasta 100%) y que no presentaran la totalidad de esa superficie bajo uso del suelo prioritario (hasta un 95%); no se decidió descartar aquellos sitios donde haya aptitud pequeña debido a que pueden ser aprovechados de igual manera; teniendo en cuenta que una hectárea tiene un rendimiento promedio entre 8 y 12 toneladas y que la mayoría de los productores tienen entre 1 y 5 ha destinadas al aguacate. El análisis se llevó a cabo en función a la superficie potencial sin

restricciones de uso del suelo, es decir, se calculó la diferencia entre el potencial total para cada categoría (óptima, apta y media) y la superficie con uso del suelo prioritario.

De manera general, de las 184 999 ha totales con las mejores condiciones para el aguacate, 76 564 ha se encuentran bajo uso del suelo prioritario y coinciden parcialmente con las áreas naturales protegidas de La Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa y Tehuacán-Cuicatlán. De toda la entidad, la zona que tiene las mejores condiciones óptimas y poca coincidencia con uso del suelo prioritario es la que se encuentra al oeste (Figura 12).

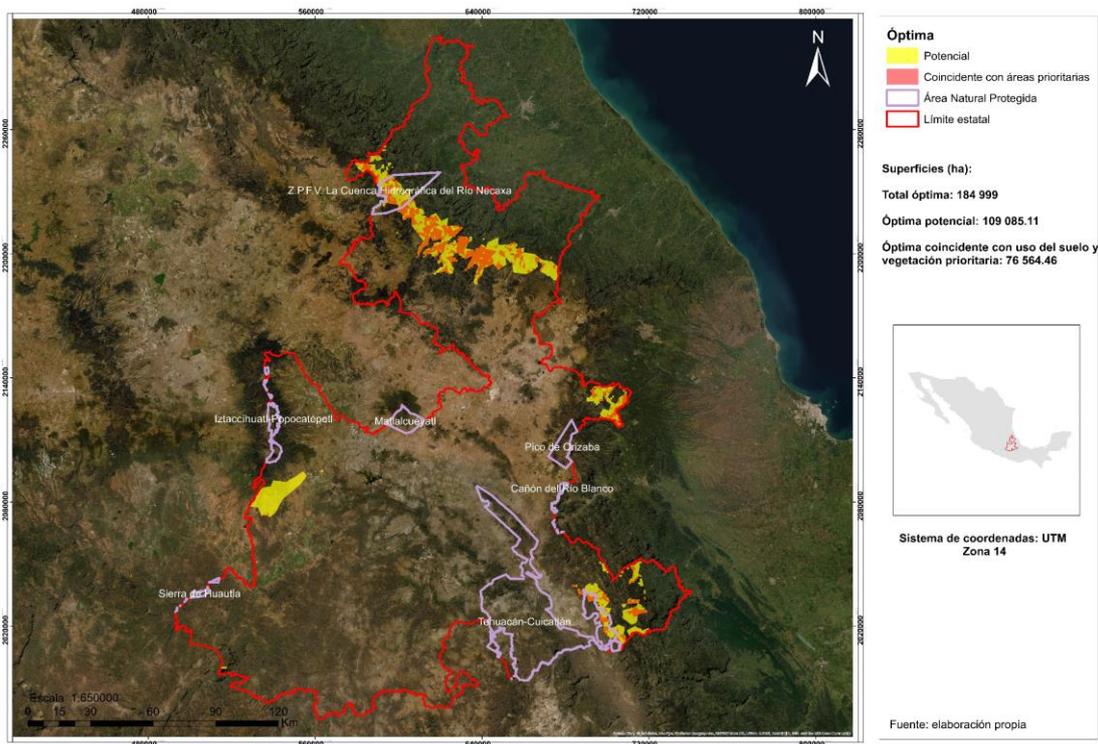


Figura 12. Categoría óptima potencial sostenible para el aguacate en Puebla.

La categoría apta es la que representa mayor superficie para el aguacate con 826 022 ha, de las cuales 185 091 están bajo uso del suelo prioritario. De nuevo, son las áreas protegidas de La Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa y Tehuacán-Cuicatlán las que contienen superficie con aptitud para las plantaciones, no obstante, son mayores las áreas libres de usos del suelo prioritario (Figura 13).

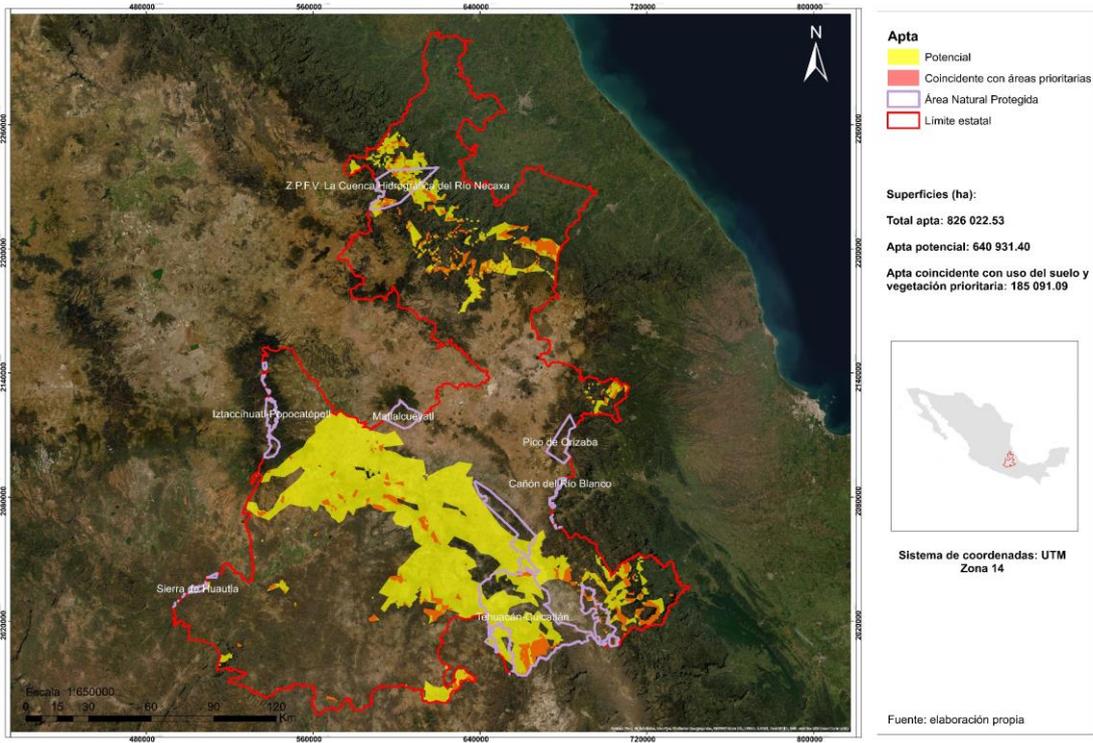


Figura 13. Categoría apta potencial sostenible para el aguacate en Puebla.

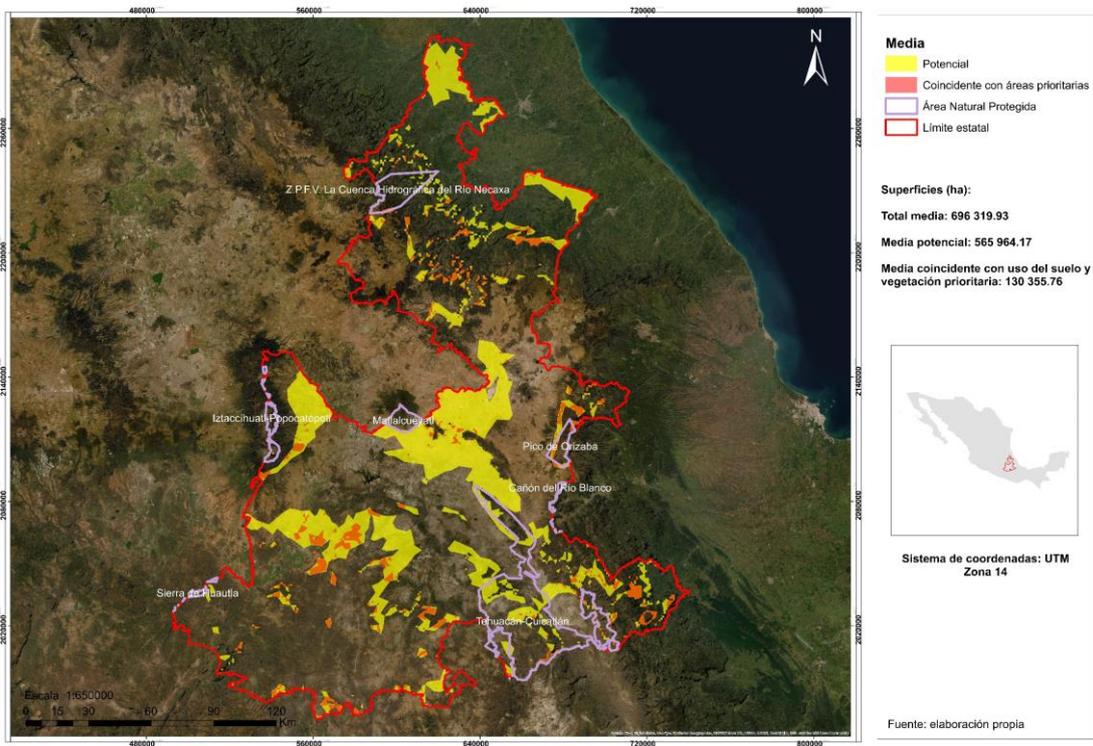


Figura 14. Categoría media potencial sostenible para el aguacate en Puebla.

La categoría media representa 696 319 ha, de las cuales 130 355 son prioritarias. Si bien es cierto que hay áreas aptas dentro de algunas áreas protegidas como Tehuacán-Cuicatlán, la mayoría de ellas se encuentra fuera, distribuyéndose principalmente en la parte central de la entidad (Figura 14).

Una vez realizado lo anterior, surgió la interrogante de cuál es el territorio real potencial para el aguacate sin las restricciones de uso del suelo. Los valores totales por municipio se pueden consultar en el Anexo 2 y de ahí es que se deriva este análisis, en el que de nuevo, se emplean las regiones obtenidas en el apartado *2.1.2 Área productora de aguacate en Puebla* del presente capítulo.

En cuanto a los municipios pertenecientes al cuadrante 1, muestran una baja sobreposición con el uso del suelo prioritario, es decir, el territorio potencial suele ser alto, en cuanto a porcentaje y superficie se refiere; el municipio que no sólo encabeza la lista de estos seis municipios, sino de los 217 de la entidad es Tepexi de Rodríguez quien tiene más de 30 000 ha de potencial total (óptima, apta y media), seguido de Atlixco, Huaquechula y Zacapala, con superficies de entre 15 000 – 28 000 ha, en su mayoría bajo la categoría apta. Mientras que Tochimilco cuenta con aproximadamente 14 000 ha donde más del 50% tienen condiciones óptimas. Una situación que llama la atención es la de Chietla, ya que es uno de los municipios con un porcentaje bajo de aptitud: el territorio total del municipio es de 32 496 ha de las cuales 2 814.4 (9%) tienen algún potencial para el aguacate, sin embargo 1 315.2 de ellas están bajo un uso del suelo prioritario, es decir 1 499.2 tienen realmente un potencial (77% apto y 23% medio). Hasta el 2005, el municipio contaba con cerca de 50 ha y rendimientos entre 8 y 9 tn/ha, valores por encima de la media, lo anterior supone que incluso con un porcentaje bajo de aptitud y con características medias, se pueden lograr buenos rendimientos.

Los municipios que tienen superficies sembradas por encima del promedio pero bajos rendimientos, en su mayoría cuentan con más del 50% de aptitud para el aguacate, con excepción de Chilchotla y Xiutetelco (entre 30% y 20%). En general, se trata también de sitios donde hay sobreposición con uso del suelo prioritario. Zacatlán y Tlatlauquitepec son los que presentan mayor superficie potencial sostenible, mientras que Yaonáhuac, Chilchotla, Cuautempan y Xiutetelco tienen entre 1 000 y 3 000 ha. A pesar de que en Petlalcingo suelen tener rendimientos por encima del promedio, no así en superficie sembrada, la aptitud en su territorio se restringe a un potencial sostenible de 2 930 ha, de las cuales el 6% con características aptas y el 94 % con medias. Por otra parte, los

municipios con los valores más altos de superficie sembrada, pero bajos rendimientos, como Quimixtlán, Teziutlán y Chichiquila, disponen de entre 5 000 y 9 000 ha de potencial sostenible, con porcentajes elevados en las categorías óptima y apta. Sería conveniente realizar en investigaciones futuras las causas de los rendimientos bajos en estos municipios, ya que los resultados muestran que contienen superficies con características idóneas para el aguacate, sin embargo, factores tales como enfermedades, plagas y manejo de la plantación influyen en el rendimiento y producción de los cultivos y las plantaciones en general, y es probable que sean éstos, y no los ambientales, los que repercuten en dicha situación, prueba de ello es que comparten región (norte) con aquellos que presentan rendimientos parecidos e incluso superiores a los del cuadrante 1.

En relación con lo anterior, la mayoría de los municipios con rendimientos por encima del promedio pero superficies bajas se distribuyen en una franja de aptitud importante del estado (norte), por lo que no es de sorprender que muchos de ellos tengan altos porcentajes y superficies favorables para el aguacate. En Tehuacán, Atexcal, Ajalpan, Cuautinchán, Molcaxac, Zoquitlán, Tianguismanalco y Vicente Guerrero se cuentan con superficies potenciales sostenibles de entre 24 000 y 10 000 ha. No obstante, dos municipios llaman la atención: Cuautinchán e Izúcar de Matamoros, ya que ambos tienen valores de rendimiento muy por encima del promedio, especialmente el segundo de ellos, a pesar de ser uno de los municipios con menor porcentaje de aptitud (cerca del 20% total de su territorio) concentrado en su mayoría en condiciones medias (92%) y apta (8%).

De los municipios que producen aguacate pero que presentan rendimientos y superficies sembradas por debajo del promedio, además de bajo porcentaje de aptitud con respecto del total de su territorio y menor superficie potencial sostenible son Guadalupe Victoria y Aquixtla, al contar con menos del 20% de aptitud del total principalmente con condiciones medias para las plantaciones. En Chignautla y Aquixtla disponen de entre 2 000 y 3 000 ha con potencial sostenible, que representa menos del 20% de sus territorios, siendo el primero de ellos el que tiene mayor superficie bajo la categoría óptima y media, y el segundo con el 85% bajo una aptitud media.

Por otra parte, están los municipios con bajos promedios de superficie sembrada y rendimiento, pero con una buena superficie total potencial como Teteles de Ávila Castillo y San Pedro Cholula que no tienen sobreposición entre sus territorios aptos y uso del suelo prioritario; tendrían de 900 a más de 7 000 ha respectivamente. En Chila, al sur de la entidad, donde el 70% de las 12 000 ha de potencial sostenible son aptas y el 30% de ellas

media; Zacapoaxtla al norte, con más de 11 000 ha de potencial sostenible, de las que 56% son óptimas y 36% aptas y el resto media. Otros municipios con alta superficie total potencial son Zautla donde se dispone de aproximadamente 9 000 ha con buenas condiciones, Atempan y Chignautla con superficies de entre 1 000 a 3 000 ha, por lo que no debería descartarse la posibilidad de incremento de plantaciones en estos sitios.

Por último, están los municipios con bajos promedios de superficie sembrada, rendimiento y alta yuxtaposición con uso del suelo prioritario. En Xochiapulco, Huauchinango y Juan Galindo, existe una sobreposición de entre 70% y 80%, dejando disponibles entre 700 a 4 000 ha con condiciones para las plantaciones. El municipio con las condiciones más desfavorables es Guadalupe Victoria; tiene baja superficie y rendimiento, poca aptitud y alta sobreposición.

2.5.2 Heladas tardías

El otro factor limitante de las plantaciones de aguacate considerado para esta investigación se refiere a las heladas, particularmente a las heladas tardías, debido a que son las que pueden causar más daños a las plantas y afectar su rendimiento y producción.

Algunas plantas suelen desarrollar mecanismos naturales que las protegen de las bajas temperaturas durante la estación fría del año; adquieren un acomodo progresivo al frío conforme la temperatura va descendiendo, lo cual se observa en la caída de las hojas y detención del crecimiento, es decir, entran en un estado de reposo. La tolerancia que desarrollen depende de diversos factores tales como: la especie, variedad, las condiciones nutricionales y fisiológicas, los ambientes a las que están adaptadas, la duración y momento de la etapa fenológica en la que se encuentren, pero fundamentalmente se trata de una característica genética (Hernández, 1995; Campos, 2005; Urbina, 2007). De tal manera que, si se llega a presentar un invierno con temperaturas mínimas bajas, y las plantas o cultivos han activado en tiempo esos mecanismos, no existirían daños o bien si se presentan serán mínimos. Por ejemplo, especies como los manzanos o almendros (y otros cultivos leñosos) presentan un proceso que los hace tolerantes al frío llamado lignificación, dividido en dos fases: la primera, al inicio del otoño que da lugar a la maduración de la madera y posteriormente, a finales de otoño y principios del invierno, el endurecimiento de esta. Al parecer, son los elementos de temperatura y radiación solar los que dictan a las plantas los procesos químicos que dan lugar a tal adaptación (Hernández, 1995; Ledesma, 2000; Campos, 2005).

La situación antes descrita corresponde a especies caducifolias, sin embargo, el aguacate no pertenece a este tipo ya que se trata de una planta perenne en la que no existe un periodo marcado de reposo, es decir, todas sus funciones fisiológicas las realiza de manera continua porque es originario de regiones templadas o cálidas donde el régimen de temperaturas no incluye inviernos demasiado fríos o prolongados, lo que significa que el aguacate es más sensible a las bajas temperaturas. No obstante, no todas las temperaturas bajas pueden provocar daños; fundamentalmente se deben combinar dos aspectos para que represente un verdadero riesgo y ponga en peligro no solo al rendimiento y producción sino a la planta misma: una etapa fenológica más susceptible al frío y temperaturas mínimas bajas, no necesariamente iguales o menos a 0°C. Para el caso de los frutales, la sensibilidad es máxima durante la floración y las primeras fases de la fructificación, y una vez que se superan estos estados fenológicos más críticos, la probabilidad de afectaciones disminuye, así como la aparición de las bajas temperaturas. Estos dos aspectos son los que se conjugan durante las llamadas tardías. En específico, para el aguacate representa un riesgo ya que la etapa de floración normal comienza en diciembre y suele terminar en febrero, mientras que la fructificación inicia entre febrero y marzo.

En la acepción meteorológica, una helada es un evento donde la temperatura registrada en el termómetro de mínimas es igual o menor a 0°C, mientras que en el sentido agrícola, sucede cuando la temperatura desciende a niveles que dañan a los cultivos. Las heladas pueden clasificarse en función de sus efectos aparentes, en heladas blancas y negras; por su génesis, de advección, irradiación y evaporación; o por el periodo de su ocurrencia, tempranas u otoñales, invernales y las tardías o primaverales (Hernández, 1995; Elias y Castellvi, 1996; Ledesma, 2000; Campos, 2005). Las heladas tardías o primaverales serán el objeto de análisis de la presente investigación, en términos probabilidad, frecuencia y riesgo agrícola asociadas a las etapas de floración e inicio de la fructificación.

Para llevar a cabo el cálculo, se utilizaron las bases de datos validadas que cumplen los estándares de confiabilidad establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (2019) provenientes del Servicio Meteorológico Nacional. La primera etapa consistió en corregir las incongruencias en las temperaturas mínimas por medio de una prueba lógica y descartar aquellas que no presentaban temperaturas inferiores a 0°C en sus registros históricos. De las estaciones resultantes, se seleccionaron las que tuvieran un mínimo 20 años de registros. De tal manera que, del total de estaciones, 37 de ellas contienen

temperaturas inferiores a cero y cumplieron con los estándares de confiabilidad (Tabla 13).

Tabla 13. Estaciones seleccionadas para cálculo de heladas tardías

Clave	Nombre	Municipio	Periodo
21007	Ahuatepec	Tecali de Herrera	1986-2014
21008	Aquixtla	Aquixtla	1986-2009
21009	Alcomunga	Ajalpan	1956-2014
21016	Balcón Diablo	Tzicatlacoyan	1986-2014
21019	Caltepec	Caltepec	1987-2014
21021	Capuluaque	Tetela de Ocampo	1986-2014
21034	Echeverría	San Andrés Cholula	1986-2014
21035	Puebla (DGE)	Puebla	1986-2014
21040	Buenavista	Guadalupe Victoria	1986-2014
21043	Huahuaxtla	Zacapoaxtla	1954-2009
21047	Ixtacamaxtitlán	Ixtacamaxtitlán	1986-2014
21049	Izúcar de Matamoros	Izúcar de Matamoros	1955-1999
21052	Alchichica	Tepeyahualco	1986-2014
21059	Oyameles	Tlatlauquitepec	1986-2014
21060	Palmar	Palmar de Bravo	1986-2014
21074	San Juan Acateno	Teziutlán	1956-2009
21077	San Luis Acatexcac	Guadalupe Victoria	1961-2014
21080	San Salvador	San Salvador El Seco	1986-2014
21081	Santa Cruz Coyotepec	San Juan Atenco	1986-2014
21082	Tecamachalco	Tecamachalco	1986-2014
21083	Tehuacán	Tehuacán	1986-2014
21087	Tepexi	Tepexi	1945-2014
21091	Teziutlán	Teziutlán	1986-2014
21096	Tlahuapán	Tlahuapán	1986-2014
21098	Tlatlauquitepec	Tlatlauquitepec	1953-1990
21102	Xochitlán	Xochitlan	1986-2014
21104	Zacapoaxtla (DGE)	Zacapoaxtla	1958-1986
21107	Zacatlán	Zacatlán	1955-2014
21111	Zautla	Zautla	1954-2009
21114	Zoquitlán	Zoquitlán	1987-2014
21117	Guadalupe Victoria	Guadalupe Victoria	1986-2014
21118	Huachinango	Huachinango	1986-2014
21119	Libres	Libres	1986-2014
21127	Xicotepec	Xicotepec	1986-2014
21129	Francisco Madero	Cuyoaco	1986-2014
21167	Calpán	Calpán	1986-2014
21203	Molcaxac	Molcaxac	1982-2014

Fuente: SMN (2018).

La probabilidad de ocurrencia de heladas indica con qué periodicidad se producen temperaturas iguales o inferiores a 0°C; en otras palabras, su finalidad es conocer si el

suceso se produjo o no, independientemente del número de veces que se registrara. Mientras que la frecuencia se asocia con la intensidad; indica el número de días en las que se registraron valores de temperaturas correspondientes a heladas.

Para efectuar la probabilidad de ocurrencia y frecuencia, se dividieron los meses en los que existe mayor riesgo de daños para dos de las etapas más sensibles, posteriormente, cada mes se fraccionó en decenas para ajustar el cálculo siguiendo el método de Hernández (1995). Cabe mencionar que la última “decena” de febrero era en realidad un periodo de 8 días, asimismo, para los meses con 31 días, la última estaba conformada por 11 días. Una vez realizado lo anterior, se aplicó una función en una hoja de cálculo para contar los datos iguales o inferiores a 0°C por decena (CONTAR.SI), este valor se dividió entre el número total de años de la serie y se multiplicó por 100 para obtener el porcentaje. Para el caso de la frecuencia de heladas, se sumaron el número de veces en que el termómetro ha descendido 0°C en cada decena, se dividieron entre el producto del total de años y el número de días que conformaba la decena (8, 10 u 11 según fuera el caso) y se multiplicaron por cien. Los resultados pueden consultarse en los Anexos 3 y 4.

En todas las estaciones seleccionadas existe una probabilidad de que durante la primera decena de febrero se presente una helada, y a excepción de las estaciones localizadas en Caltepec (21019), Tepexi (21087), Xicotepéc (21127) y Molcaxac (21203), la probabilidad de ocurrencia puede llegar hasta la tercera semana de marzo.

En los municipios de Ajalpán (21009), Guadalupe Victoria (21040, 21077 y 21117), Ixtacamaxtitlán (21047), Tepayahualco (21052), Tlatlauquitepec (21059), Palmar de Bravo (21060), San Salvador El Seco (21080), San Juan Atenco (2081) y Cuyoaco (21129) hay probabilidades de entre 3% y 20 % de que ocurran heladas hasta el mes de mayo. La frecuencia de días con helada complementa lo antes dicho: dependiendo del sitio, son las primeras decenas de febrero en las que se tienen mayor número de días con heladas y conforme se va avanzando en el tiempo, estas disminuyen, sin embargo, en municipios como San Salvador El Seco y Cuyoaco, la frecuencia de heladas en el mes de mayo llega a más de diez días. La situación anterior corresponde y refuerza los resultados obtenidos por medio de la zonificación, ya que a excepción de Tlatlauquitepec y Ajalpan, en estos sitios no se produce aguacate y tienen potencial medio, poco apto o prácticamente no cuentan con condiciones favorables para las plantaciones. En este sentido, otros municipios donde la superficie para el aguacate es poca o nula como Tlahuapán (21096), Aquixtla (21008) y Libres (21119) hay probabilidad de ocurrencia y baja frecuencia no

más allá de la segunda decena de marzo, mientras que en el municipio Libres, se prolonga hasta la tercera semana de marzo e incluso hasta abril.

Por otro lado, los municipios que no producen pero tienen aptitud para ello como, Xicotepec (21127), Tecali de Herrera (21007), Tzicatlacoyan (21016), Puebla (21035), Calpán (21167), Xochitlán Todos Santos (21102) y Tecamachalco (21082) tienen probabilidades bajas de helada, siendo este último el que quizá tenga más riesgo, puesto que las probabilidades de que se presenten temperaturas iguales o inferiores a 0°C hasta la primera decena de marzo van del 30% a poco más del 50%, disminuyendo a un 13% de que sucedan hasta la primera decena de abril y no más allá.

Mientras que en los municipios que producen aguacate como Tetela de Ocampo (21021), San Andrés Cholula (21034), Zacapoaxtla (21104 y 21110), Izúcar de Matamoros (21049), Hueyapan (21074), Tehuacán (21083), Teziutlán (21091), Tlatlauquitepec (21098), Zacatlán (21107), Zautla (21111), Zoquitlán (21114) y Huauchinango (21118) existen probabilidades bajas de heladas, siendo San Andrés Cholula, Tehuacán, Zacatlán y Zautla donde es más probable que la ocurrencia suceda hasta finales de marzo e incluso hasta la tercera semana de abril.

Para realizar el análisis del riesgo agrícola de helada se empleó la probabilidad de ocurrencia de helada y el porcentaje en el que las plantas se encuentren en alguna de las dos etapas más sensibles: floración y fructificación, para lo cual construyeron modelos fenológicos con base en Rocha *et al.* (2011); Romero (2012); Tapia, Larios y Barradas (2012); Reyes *et al.* (2015); Salazar, Ibarra y González (2018), tomando en consideración que durante el mes de febrero, la mayoría de las plantas están en floración ya que esta etapa ha iniciado en enero e incluso desde diciembre, por lo tanto, se ha partido que durante la primera decena de febrero el 90% de las plantas se encuentran en esta etapa y disminuye hasta el mínimo durante la segunda decena de marzo, mientras que la fructificación comenzaría a principios del mes de marzo y se prolonga hasta mayo. Es importante mencionar que los modelos fenológicos son teóricos y que deberán ser refinados con observaciones fenológicas rigurosas, sin embargo, son una buena herramienta para obtener un primer acercamiento del riesgo agrícola de helada para el aguacate (Anexo 5).

De los municipios considerados para el análisis, básicamente, Guadalupe Victoria es el que presenta mayor riesgo, puesto que hay más probabilidades que en cualquier otro sitio

que se presenten heladas durante la etapa de floración y al inicio de la fructificación (Figura 15), pero no solo eso, sino que existe la probabilidad de que ya formado el fruto puedan ocurrir heladas. Aunque la sensibilidad del fruto al frío disminuye conforme va creciendo, es cierto que puede afectar a la calidad del mismo.

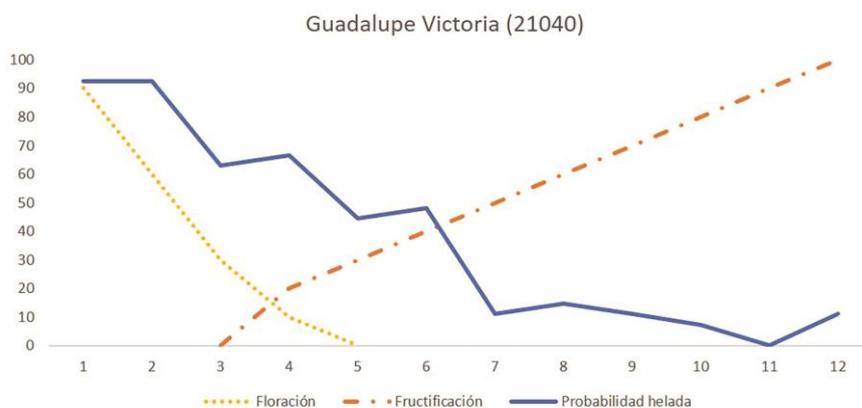


Figura 15. Riesgo de helada para el aguacate en Guadalupe Victoria. Fuente: elaboración propia.

Otro sitio donde se produce aguacate y que puede suceder una situación similar es en Ajalpán (Figura 16). Si bien, las probabilidades son menores que en Guadalupe Victoria, es importante tener en cuenta que en algún momento pueda suceder, siendo uno de los periodos con mayores riesgos los últimos días de febrero y principios de marzo, ya que durante este periodo se lleva a cabo la transición de una etapa a otra.

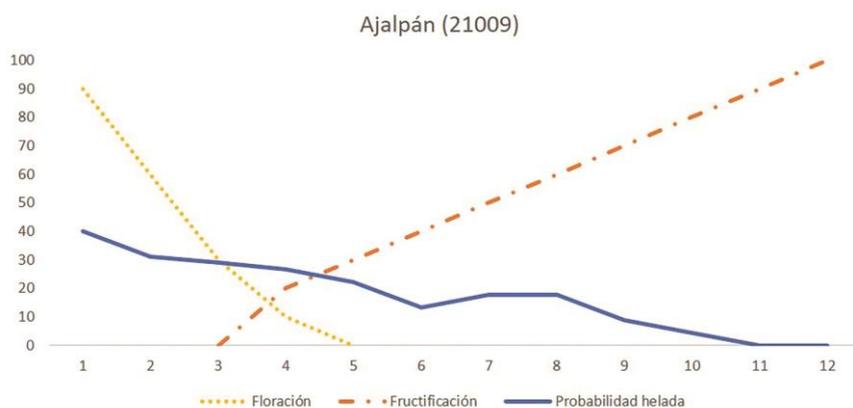


Figura 16. Riesgo de helada para el aguacate en Ajalpán. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, si se consideran a los municipios de Ixtacamaxtitlán, Tepayahualco, San Salvador El Seco, San Juan Atenco y Cuyoaco (ver Anexo 5) para producir aguacate, será necesario que las plantaciones se localicen en los sitios de aptitud media y tener en cuenta que hay probabilidades que en algún momento las heladas afectarán a las etapas más sensibles; esto no significa que no sea posible plantar aguacate en estos sitios, sino que

deberá considerarse una inversión en métodos de combate de heladas para reducir posibles daños y pérdidas.

2.6 Zonificación agroclimática bajo escenarios de cambio climático

En este apartado, más que describir cómo sería el clima o los valores de las variables en el futuro, el interés se centró en conocer si aumentará o disminuirá el área potencial para el aguacate, partiendo de la pregunta ¿en qué municipios disminuye y en cuáles aumenta?

El método empleado para la zonificación bajo escenarios de cambio climático fue el mismo que se utilizó bajo condiciones actuales; en este caso, se sustituyeron los valores de temperatura y precipitación del escenario base por los de cambio climático. Se ha decidido conservar las variables edáficas y de relieve porque es más probable que se mantengan en el tiempo, no así el uso del suelo, razón por la que no se ha incluido en este enfoque. De igual manera, los criterios y pesos obtenidos mediante el AHP se aplicaron para la zonificación a futuro. Una vez que se obtuvieron los resultados, se calcularon las áreas y su valor porcentual con respecto del total de la superficie de los municipios. Para obtener el valor de cambio de aptitud se usó la diferencia entre el valor porcentual de aptitud con cambio climático menos el porcentaje de aptitud original; este método resultó ser más representativo que otros que también fueron calculados como el porcentaje de variación, desviación típica o coeficientes de variación pero que no han sido incluidos aquí.

Para entender la descripción que se presenta más adelante es necesario tener en cuenta los siguientes principios que se obtuvieron al analizar los resultados: 1) los porcentajes totales de incremento, disminución o igualdad de una categoría con relación al escenario base varían espacialmente; 2) la ganancia o pérdida del porcentaje de aptitud implica el aumento o reducción de otra, es decir, se da una relación inversa (Figura 17); 3) si existe un cambio, ya sea de aumento o disminución, este ocurre hacia la categoría más inmediata, ya sea la que le antecede o la que le sucede; y 4) hay mayor posibilidad de que ocurra un cambio hacia una categoría inferior que viceversa; en otras palabras, es más posible que se pierdan las mejores condiciones para el aguacate a que aparezcan nuevas.

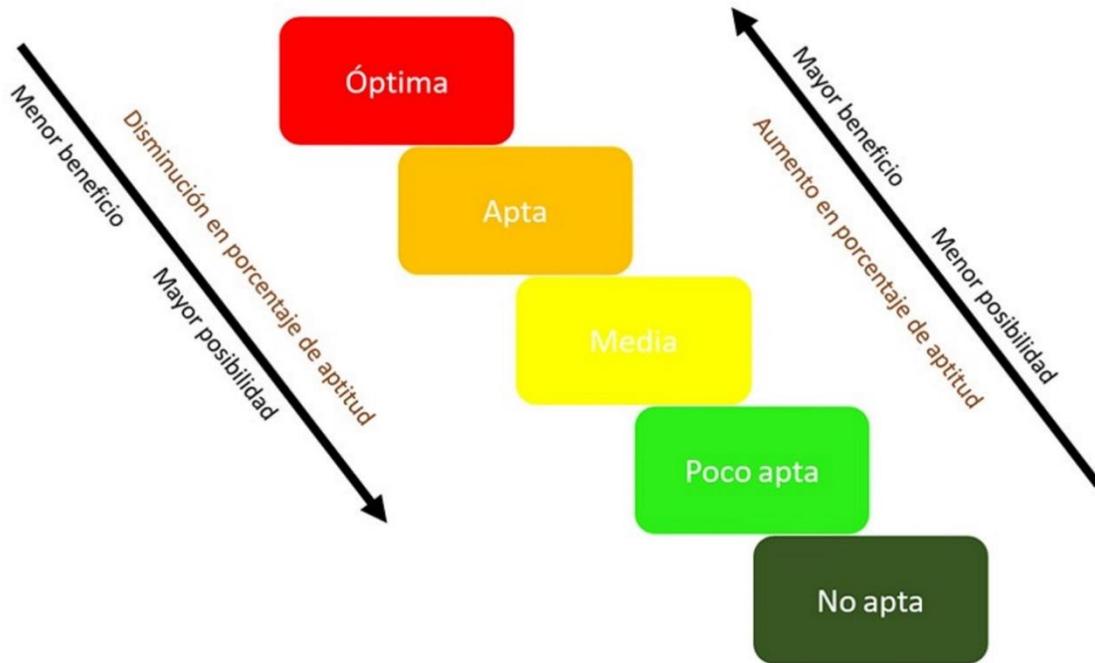


Figura 17. Comportamiento del cambio de categorías de aptitud bajo escenarios de cambio climático. Fuente: elaboración propia.

2.6.1 Horizonte 2015-2039

Óptima

Se podría decir que el porcentaje total de la categoría óptima aumenta bajo los modelos GFDL y HADGEM, mientras que en el CNRM se mantiene en 5%. Las cifras por sí solas pueden indicar que permanecen igual o incluso mejoran, sin embargo, al acompañarlas de cartografía el análisis es distinto. Los cambios son relativos y la distribución es desigual, la diferencia más marcada sucede en la región oeste, que para los tres modelos empleados disminuye, el caso contrario ocurre en la parte norte donde se indica un aumento de esta categoría con un emplazamiento hacia el sur. Mientras que al este y sureste de la entidad, donde también se localizan áreas óptimas, igualmente parecen aumentar.

Los sitios con un mayor porcentaje de cambio bajo el modelo CNRM son Zacapoaxtla, Coyomeapan, Tlatlauquitepec, Atempan y Zoquitlán quienes tienen un aumento relativo en la categoría óptima. Mientras que en Los Reyes de Juárez, Chichiquila, Quimixtlán, Naupan y Ahuacatlán sucede lo contrario, hay una disminución con respecto del escenario base. Para los modelos GFDL y HADGEM los escenarios para la aptitud óptima son parecidos, Teziutlán, Xochiapulco, Zacapoaxtla y Atempan coinciden en que hay un aumento de porcentaje óptimo en ambos modelos, asimismo en Tochimilco, Los Reyes

de Juárez, Atzitzihuacán, Acteopan y Tepemaxalco presentan una disminución en ambos casos. La coincidencia en los tres modelos donde aparecen los municipios de Zacapoaxtla y Atempán parece indicar que se verán favorecidos, por el contrario, el municipio de Los Reyes de Juárez disminuirá más del 20% la aptitud óptima con la que contaba (Figura 18).

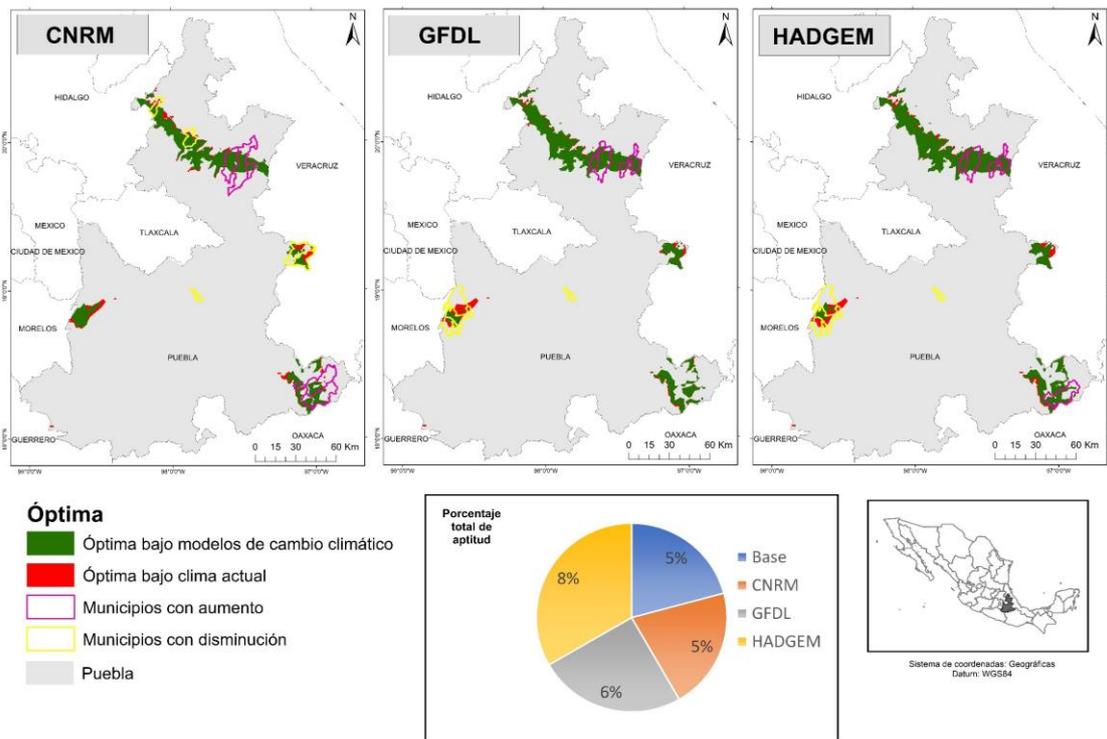


Figura 18. Distribución de las condiciones óptimas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039). Fuente: elaboración propia.

Apta

El escenario para esta categoría indica una disminución en porcentaje. El modelo CNRM es muy parecido al del clima actual, sólo disminuye del total el 1%, principalmente en la parte este de la entidad. Bajo el modelo HADGEM, hay una disminución del 2% respecto del total, lo que sucedería bajo este escenario es un desplazamiento de la franja apta hacia el norte, con disminuciones tanto en el norte, este y suroeste. El caso más llamativo sucede con el modelo GFDL, donde se pasa de tener el 24% del total actual al 15% con una importante reducción en la franja central apta (Figura 19).

Los municipios con mayor porcentaje de aumento con respecto a su aptitud actual en esta categoría bajo el modelo CNRM son Los Reyes de Juárez, Chichiquila, Quimixtlán, Ajalpan y Ahuacatlán, pero hay una disminución, principalmente en Tlaltenango, La

Magdalena Tlatlauquitepec, Amozoc, San Miguel Xoxtla y Nealtican.

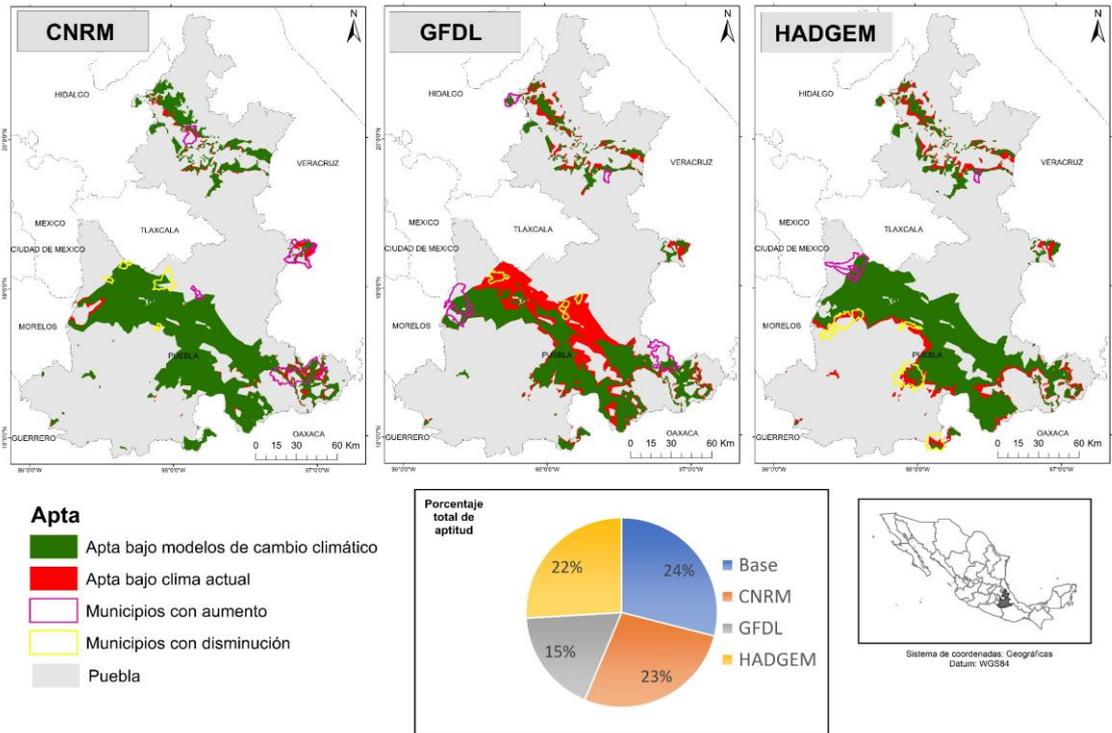


Figura 19. Distribución de las condiciones aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039). Fuente: elaboración propia.

En el modelo GFDL, en Tochimilco y Atzitzihuacán, habría un aumento debido a que la superficie con condiciones óptimas pasa a ser apta; es en este modelo donde diversos municipios pierden la categoría de apta en su totalidad, tales como San Pedro Cholula, San Salvador Huixcolotla, Zaragoza, por mencionar algunos. Para el modelo HADGEM, municipios como Domingo Arenas, Huejotzingo, Zaragoza y Calpan aumentan en porcentaje entre 30% y 54% pero sitios como San Juan Atzompa y Huaquechula disminuye en más del 50%.

Media

Esta categoría disminuye su porcentaje bajo los modelos CNRM y GFDL, mientras que en el HADGEM aumenta. El modelo más similar al escenario base es el CNRM, en el cuál, las disminuciones se hacen notar en la parte suroeste de la entidad; municipios como San Martín Totoltepec y Tlapanalá perderían la mayoría del porcentaje de esta categoría. Para el caso del modelo GFDL habría una disminución total del 4%; los principales cambios de aptitud sucederían al norte, sureste y suroeste de la entidad; municipios como San Martín Totoltepec y Rafael Lara Grajales perderán la totalidad de aptitud media. En

el modelo HADGEM incrementa a 3% del total, principalmente en la parte central y este del estado; San Juan Atzompa, San Juan Atenco, San Nicolás Buenos Aires y Guadalupe Victoria tendrían un aumento en sus condiciones medias. En lo que coinciden los tres modelos es que en la parte sur, sureste y suroeste las condiciones medias pasarán a ser poco aptas (Figura 20).

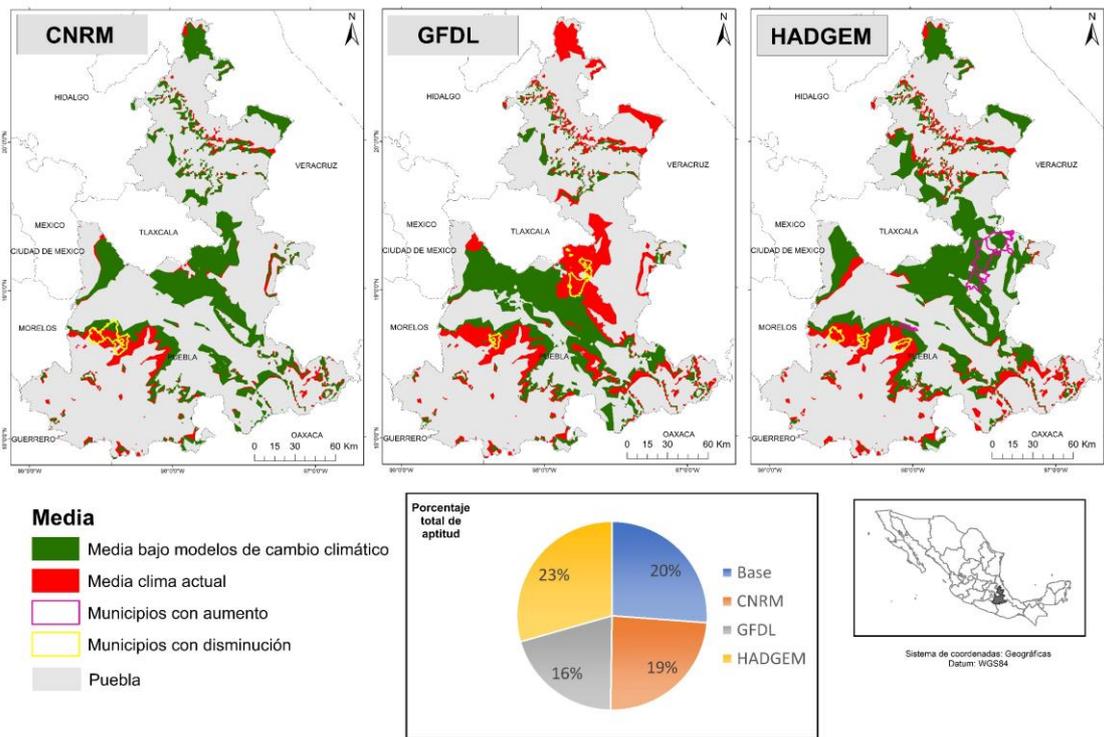


Figura 20. Distribución de las condiciones medias para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039). Fuente: elaboración propia.

Poco apta y no apta

Realmente un aumento en la categoría no apta no implicaría mayor problema si se pasa de no tener condiciones para el aguacate a tener algunas con varias restricciones como las que representa la categoría poco apta (Figura 21). Asimismo, la disminución de las condiciones poco aptas tampoco significa beneficio, porque la mayoría de las zonas donde se presenta esta situación decrecen pero hacia condiciones no aptas. Las pérdidas de porcentaje medias antes mencionadas se convertirán en poco aptas, principalmente en el norte, este, centro y oeste de la entidad; municipios como San Martín Totoltepec y Tlapanalá se verían afectados. Lo que es casi seguro es el aumento en la categoría no apta para el aguacate; espacialmente las zonas se distribuirán en las provincias del Carso Huasteco, Sierras y Valles Guerrerenses y Sierras del Sur de Puebla (Figura 22).

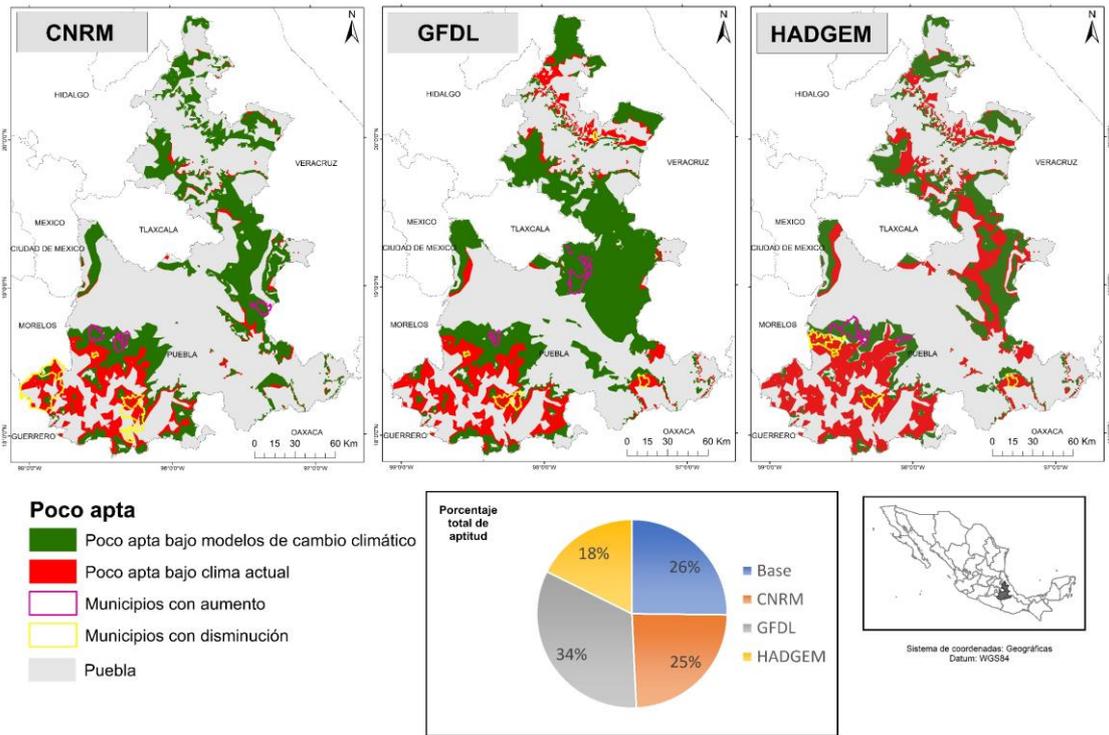


Figura 21. Distribución de las condiciones poco aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039). Fuente: elaboración propia.

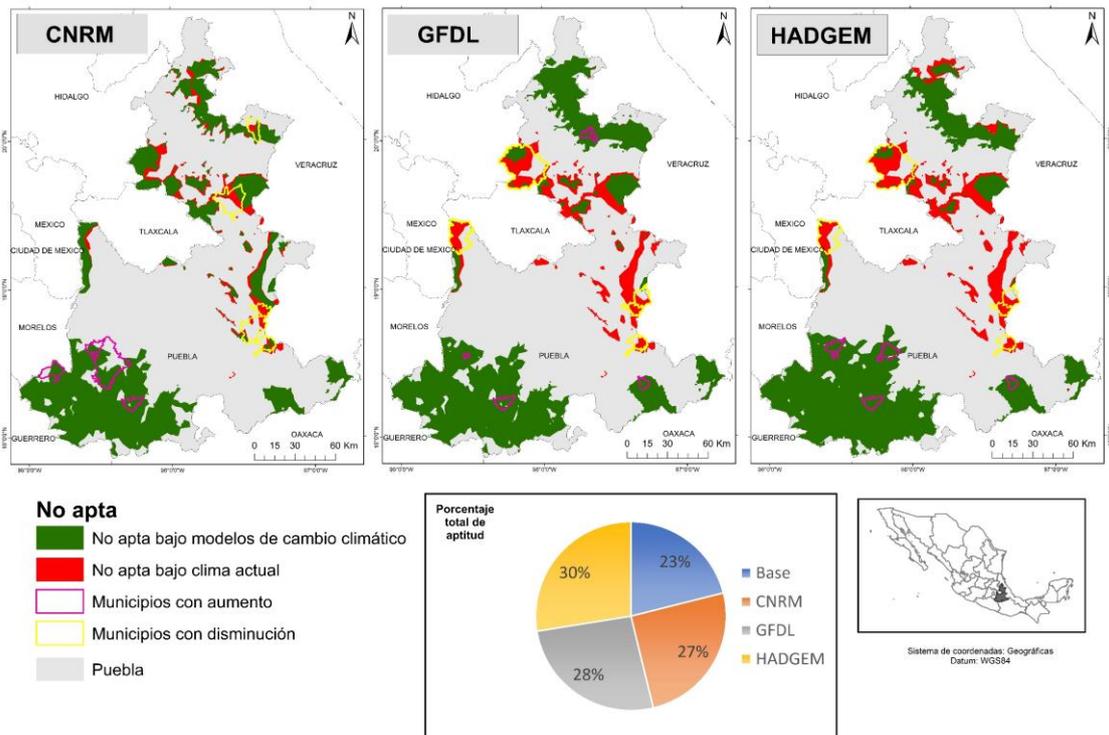


Figura 22. Distribución de las condiciones no aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2015-2039). Fuente: elaboración propia.

2.6.2 Horizonte 2045-2069

Óptima

Para este periodo, las condiciones óptimas aumentarían en total entre 1% y 2%, sin embargo, se ha mencionado que espacialmente, el incremento significa la disminución en otras áreas bajo esta categoría. Prácticamente en los tres modelos se modificarán las áreas con las mejores características en la región este de la entidad, estas pasarían de óptimas a aptas. Se trata de una situación parecida al periodo 2015-2039, pero en este caso la reducción es mayor; municipios como Atztitzihuacán, Acteopan, Tepemaxalco y Tepango de Rodríguez presentarán las mayores conversiones. En cuanto a los aumentos, es decir, las áreas donde pasaron de condiciones aptas a óptimas se distribuyen en la parte norte, donde el grosor de la franja presenta un crecimiento hacia el sur; y al sur sureste, en donde los municipios como Coyomeapan y Zoquitlán se verán beneficiados por tal cambio (Figura 23).

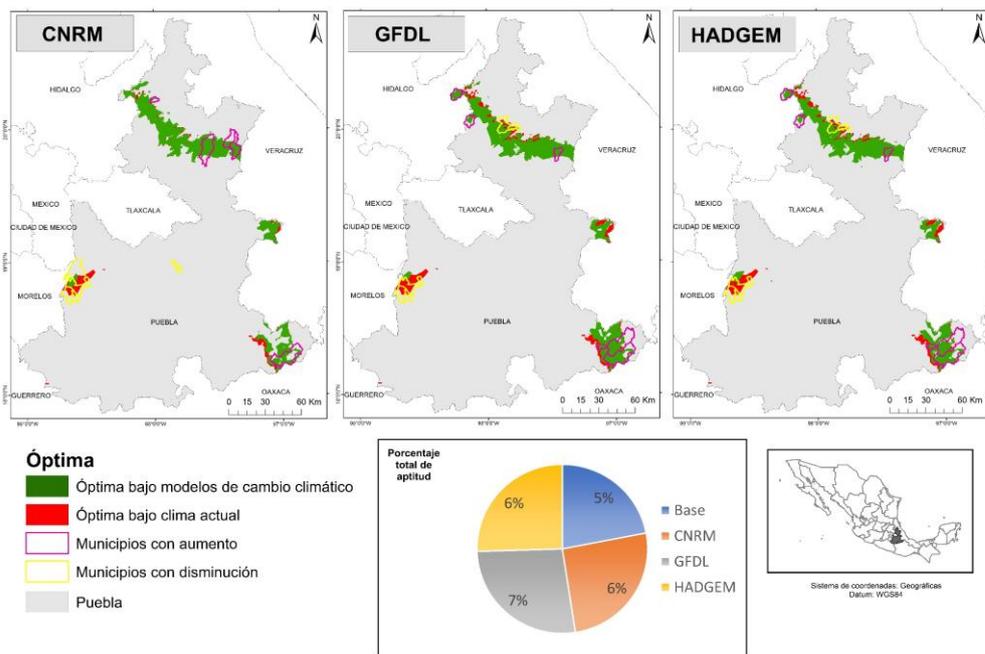


Figura 23. Distribución de las condiciones óptimas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069). Fuente: elaboración propia.

Apta

Las condiciones aptas disminuirían en los tres modelos empleados; se pasaría de 24% del total en la entidad a 21% en el modelo CNRM y 19% en los dos restantes. Bajo esta categoría, los tres modelos muestran patrones similares en cuanto a la distribución de las

áreas; la más evidente es que la “franja apta” que atraviesa la entidad de oeste-sureste, se desplazaría hacia el centro norte y al occidente, dejando como disminuciones las áreas donde originalmente contenían condiciones aptas, que seguramente cambiarían a medias. Otros cambios notables suceden en la parte sur sureste, ya cerca de la Sierra Negra, donde se ha visto que en este caso el cambio es benéfico, puesto que se convierten de aptas a óptimas. Por último, las disminuciones en áreas aptas hacia categorías inferiores se darían en la parte norte de la entidad, y habría cambios en zonas donde las condiciones bajo el escenario eran medias (Figura 24).

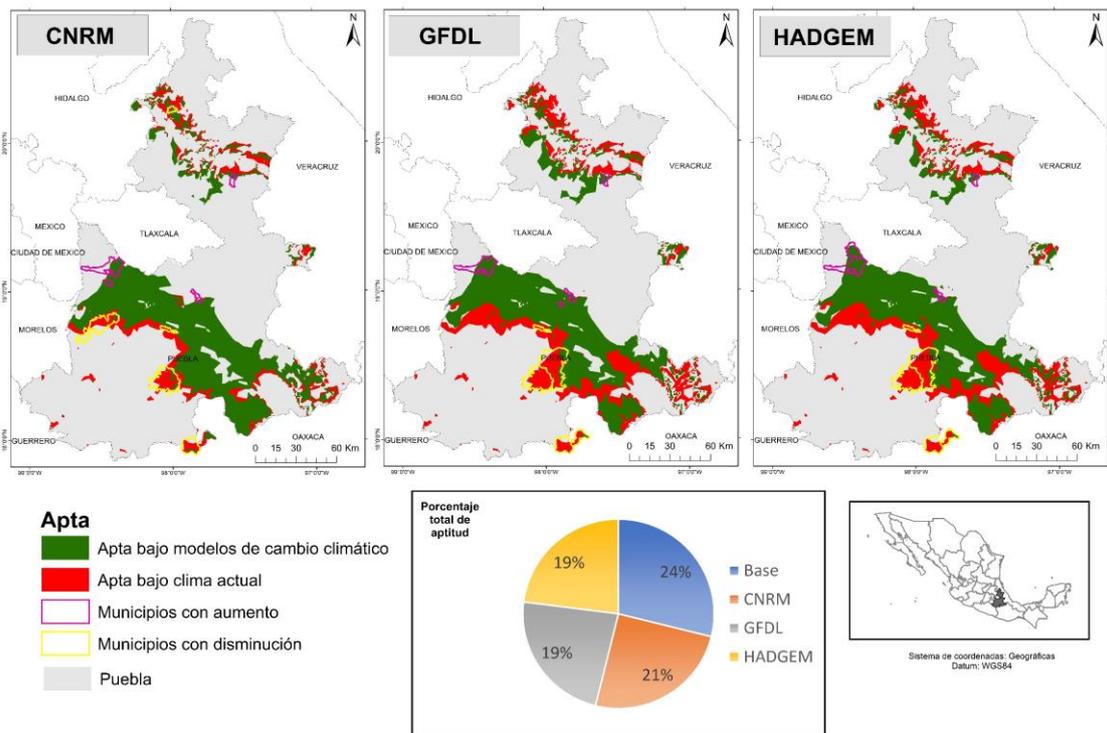


Figura 24. Distribución de las condiciones aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069). Fuente: elaboración propia.

Media

En esta categoría, del 20% que representa en el escenario base, aumenta a 25% en el modelo CNRM, 22% en el GFDL y para el HADGEM se mantiene. Bajo los tres modelos empleados, la distribución de dicha categoría difiere en función a las condiciones actuales. Aunque algunas de las áreas que antes contaban con condiciones aptas han pasado a ser medias, el cambio principal proviene de la conversión de la categoría poco apta que para este periodo podrían mejorar a condiciones medias, principalmente en la parte centro-norte y centro-este del estado. Por otra parte, las zonas donde actualmente

contenían condiciones medias para el aguacate y que ya no coinciden en este periodo, se han convertido en poco aptas, en particular al norte y todo el sur de Puebla (Figura 25).

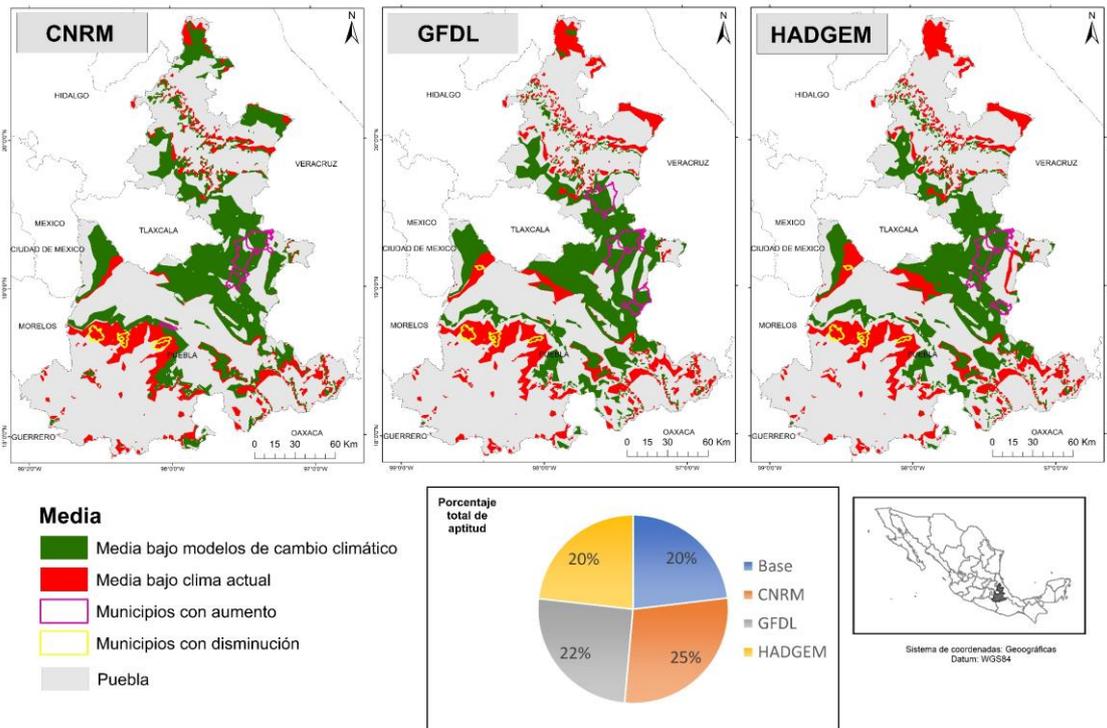


Figura 25. Distribución de las condiciones medias para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069). Fuente: elaboración propia.

Poco apta y no apta

En el escenario base el porcentaje que representa a las condiciones poco aptas corresponde a 26%, para este periodo hay una disminución en esta categoría: en el modelo CNRM se tendría 17%, 16% en el GFDL y 18% en el HADGEM. Esta reducción no significa una mejora en las condiciones, puesto que es más posible que se conviertan en condiciones no aptas más que en medias (Figura 26). Mientras que los cambios en los totales de la categoría no apta indican un aumento; de tener 23% del territorio poblano, pasarán a 29% (CNRM y GFDL) y 34 % (HADGEM), principalmente la mayor parte del sur de Puebla (Sierras y Valles Guerrerenses y Sierras del Sur de Puebla), al norte (Carso Huasteco) y al sureste. Esta situación coincide con los resultados de los tres modelos bajo el horizonte 2015-2039, lo que hace pensar que en efecto, habrá mayor superficie con condiciones no aptas para el aguacate más que óptimas y aptas a corto y medio plazo (Figura 27).

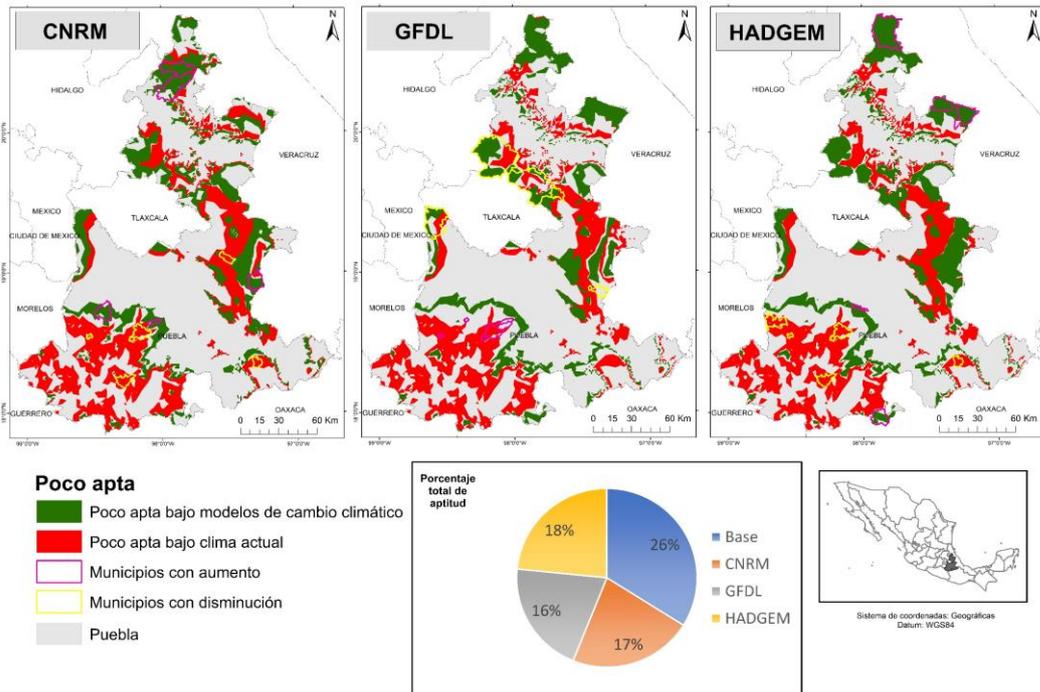


Figura 26. Distribución de las condiciones poco aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069). Fuente: elaboración propia.

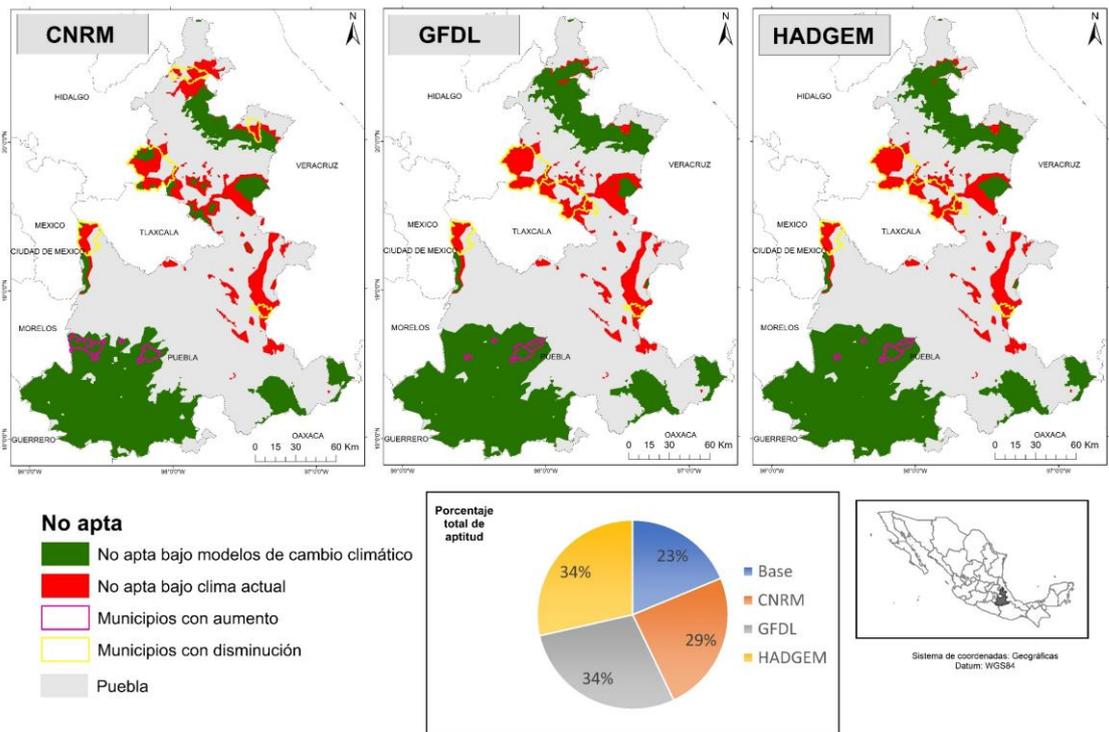


Figura 27. Distribución de las condiciones no aptas para el aguacate bajo modelos de cambio climático (2045-2069). Fuente: elaboración propia.

2.7 Municipios productores de aguacate ante el cambio climático

En cuanto a los municipios productores de aguacate, sólo se tomaron en cuenta las categorías más importantes (óptima y apta) y su aumento o disminución en función de la diferencia porcentual para su análisis bajo los tres modelos empleados.

En este caso, se decidió sintetizar los resultados de los tres modelos por horizonte debido a que la información pueda ser utilizada para la construcción de un indicador que refleje la variación de aptitud por efecto del cambio climático. El desarrollo de este indicador se realizó de la siguiente manera:

En primer lugar, se descartaron las categorías que tienen restricciones para las plantaciones (media y poco apta) y las no aptas; principalmente porque el enfoque estaba orientado hacia la pérdida o ganancia de las mejores superficies (óptimas y aptas) y también porque no todos los municipios productores cuentan con esas categorías en sus territorios. Se descartó realizar una combinación de las categorías óptima y apta, puesto que funcionaría para el escenario base, sin embargo para los porcentajes bajo modelos de cambio climático no. Por ejemplo, en el municipio de Ajalpan, el porcentaje actual (suma de las categorías óptima y apta) sería de 60%, pero para el modelo CNRM disminuye en el óptimo (-4 %) y aumenta en la apta (15%), lo que resulta en 11% positivo, es decir, se podría interpretar que hay aumento en ambas, lo cual es incorrecto.

Posteriormente, se analizaron los cambios porcentuales y se encontró que varían al interior de cada municipio y entre municipios. Debido a lo anterior, el establecer condiciones en función a la totalidad de las combinaciones era la vía más adecuada. Las combinaciones y la asignación de un valor se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Condiciones y valores de los resultados de cambio de aptitud por cambio climático

Condiciones	Valores
En los 3 modelos hay un aumento	1
En 2 modelos hay aumento y 1 permanece sin cambio	0.75
En 2 modelos hay aumento y 1 disminución	0.50
En 1 modelo hay aumento, 1 permanece igual y 1 hay disminución; donde el aumento es mayor que la disminución	0.25
En los 3 modelos hay disminución	-1
En 2 modelos hay disminución y 1 permanece sin cambio	-0.75
En 2 modelos hay disminución y 1 hay aumento	-0.50
En 1 modelo hay disminución, 1 permanece igual y 1 aumento; donde la disminución es mayor que el aumento	-0.25
Los tres modelos permanecen sin cambios	0

Al realizarlo de esta manera se incluyen los cambios en los tres modelos, independientemente de la cantidad porcentual, sin embargo, todavía se tiene el inconveniente de contar con dos categorías (óptima y apta), por lo que nuevamente se aplicaron una serie de condiciones según la totalidad de combinaciones posibles y exclusivamente en función del signo que contienen (correspondientes a los valores de la Tabla 14). Una vez que se clasificaron los datos de esta manera, fue posible interpretar los resultados, de tal forma que cada valor (del 1 al 9) representa algo más que un signo. Las condiciones y los valores finales se muestran en la Tabla 15, mientras que la descripción completa de los valores se puede consultar en los Anexos 6 y 7.

Tabla 15. Nuevas condiciones según combinaciones posibles

Condiciones	Valor
Positivo y positivo (+) (+)	9
Positivo e igualdad (+) (0)	8
Positivo y negativo (+) (-)	7
Igualdad y positivo (0) (+)	6
Negativo y positivo (-) (+)	5
Ambos permanecen sin cambios (0) (0)	4
Negativo e igualdad (-) (0)	3
Igualdad y negativo (0) (-)	2
Negativo y negativo (-) (-)	1

Para el horizonte 2015-2039, el municipio que incrementa ambas aptitudes en los tres modelos es Vicente Guerrero; Ajalpan, Quimixtlán y Aquixtla tienen posibilidad de aumentar en la categoría óptima y prácticamente incrementarían las áreas aptas, mientras que Tetela de Ocampo y Zautla también tienen la posibilidad de que el aumento en ambas categorías sea benéfico. La disminución en las condiciones óptimas tiene altas posibilidades en convertirse en la categoría apta en municipios como Atlixco, Tochimilco, Coxcatlán, Chichiquila, Cohuecán y Chilchotla. El caso contrario, Cuautempan es el municipio que perdería ambas categorías de aptitud. También están aquellos municipios que no tienen condiciones óptimas, y éstos permanecen igual a futuro, pero disminuyen los porcentajes de la categoría apta; la mayoría de ellos se distribuyen en la parte oeste, centro, centro sur, suroeste y sureste de la entidad: Cuautinchán, Chietla, Chila, Huaquechula, Tehuacán, Tepexi y Zacapala son ejemplo de

ello. Por último, en Guadalupe Victoria y Teteles de Ávila Castillo se mantendrían como en el escenario base (Figura 28).

En el horizonte 2045-2069, Aquixtla, Chilchotla, Vicente Guerrero, Zacatlán y Zautla incrementarían sus porcentajes tanto en las condiciones óptimas como en las aptas; Quimixtlán, Tetela de Ocampo y Xiutetelco también aumentarían sus condiciones óptimas y tienen posibilidades medias de que lo hagan las aptas. En los municipios de Ajalpan, Atempan, Chignautla, Huauchinango, Hueyapan, Juan Galindo, Teziutlán, Tlatlauquitepec, Xochiapulco, Yaonahuac, Zacapoaxtla y Zoquitlán, que se distribuyen principalmente en la parte norte, este y sureste del estado, sucederá que las condiciones aptas pasen a ser óptimas, mientras que en Cuautinchán, Chapulco, Nealtican, Tuianguismanalco y Tlaltenango aparecerían áreas bajo la categoría apta, hecho con el que no cuentan en la actualidad. En Chichiquila y Tochimilco las condiciones óptimas pasarán a aumentar la categoría apta. Los casos más preocupantes serían los de Atlixco, Cohuecán, Coxcatlán y Cohuecán debido a que presentarían disminuciones en ambas categorías, es decir, es posible que en estos sitios dominen las condiciones medias para el aguacate. En este tenor, los municipios que no tienen condiciones óptimas pero sí aptas, sucedería una situación similar al del horizonte 2015-2039, es decir, las condiciones aptas pasarían a media o poco aptas: Caltepec, Chietla, Chila, Huaquechula, Izúcar de Matamoros, Molcaxac, Petlalcingo, Tehuacán, Tepexi, Zacapala y Zapotitlán serían los afectados. Por último, en Atexcal, Guadalupe Victoria, San Andrés Cholula, San Jerónimo Tecuanipan, San Pedro Cholula, Santa Isabel Cholula y Teteles de Ávila Castillo las condiciones en este horizonte serán como las del escenario base (Figura 29).

Ahora bien, surge la interrogante si existen coincidencias en cuanto a los valores de aptitud de cambio climático en los municipios productores, es decir, si para ambos horizontes, en los tres modelos ocupados, habrá aumentos o disminuciones de las mejores condiciones en estos sitios. La respuesta es sí, en 32 de los 49 municipios productores hay coincidencias (Figura 30), solamente en Ajalpan, Atexcal, Atlixco, Cohuecan, Coxcatlán, Cuautinchán, Chapulco, Chilchotla, Nealtican, San Andrés Cholula, San Jerónimo Tecuanipan, San Pedro Cholula, Santa Isabel Cholula, Tianguismanalco, Tlaltenango, Xiutetelco y Zacatlán no hay tal semejanza.

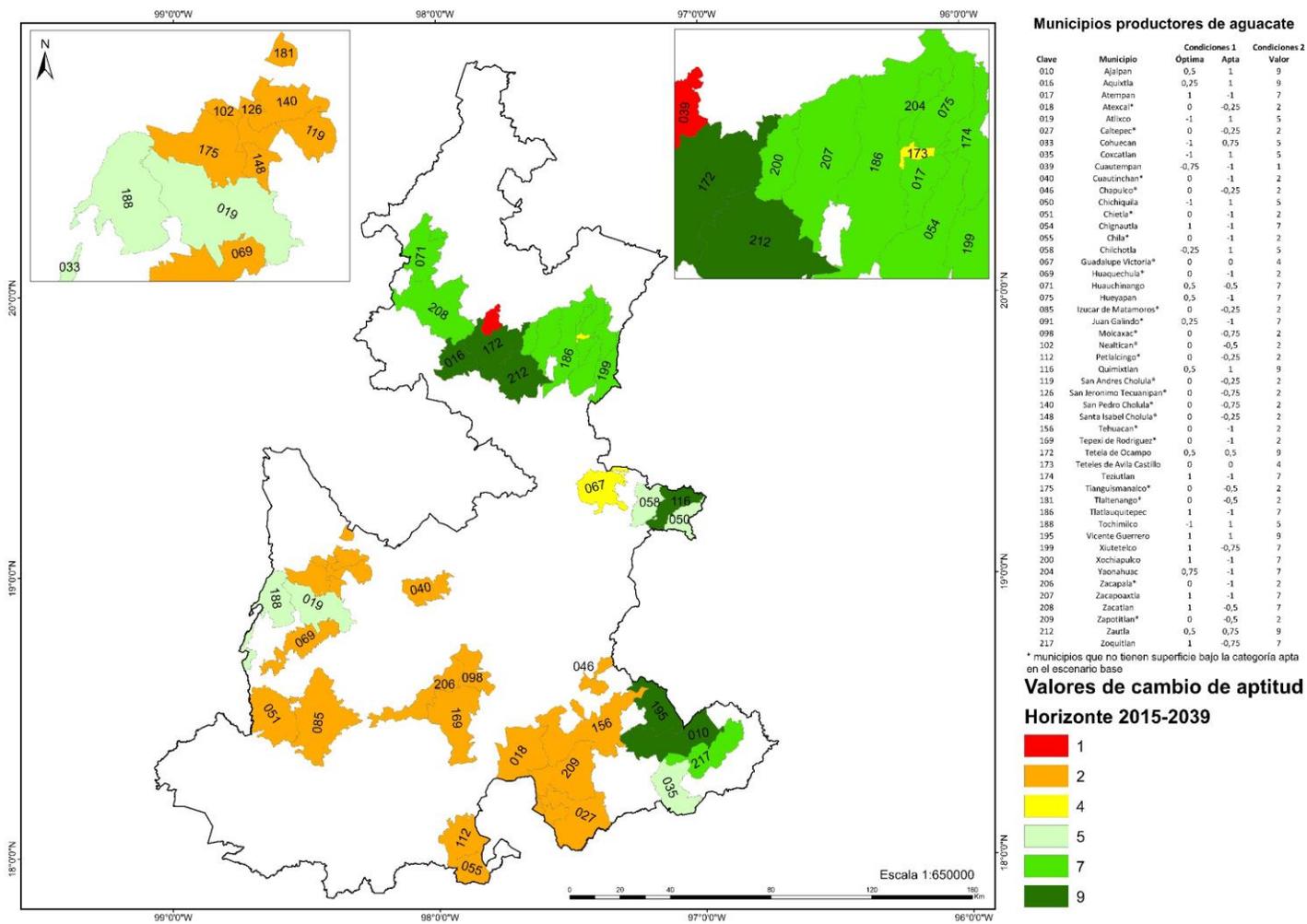


Figura 28. Valores de cambio de aptitud bajo para el horizonte 2015-2039. Fuente: elaboración propia.

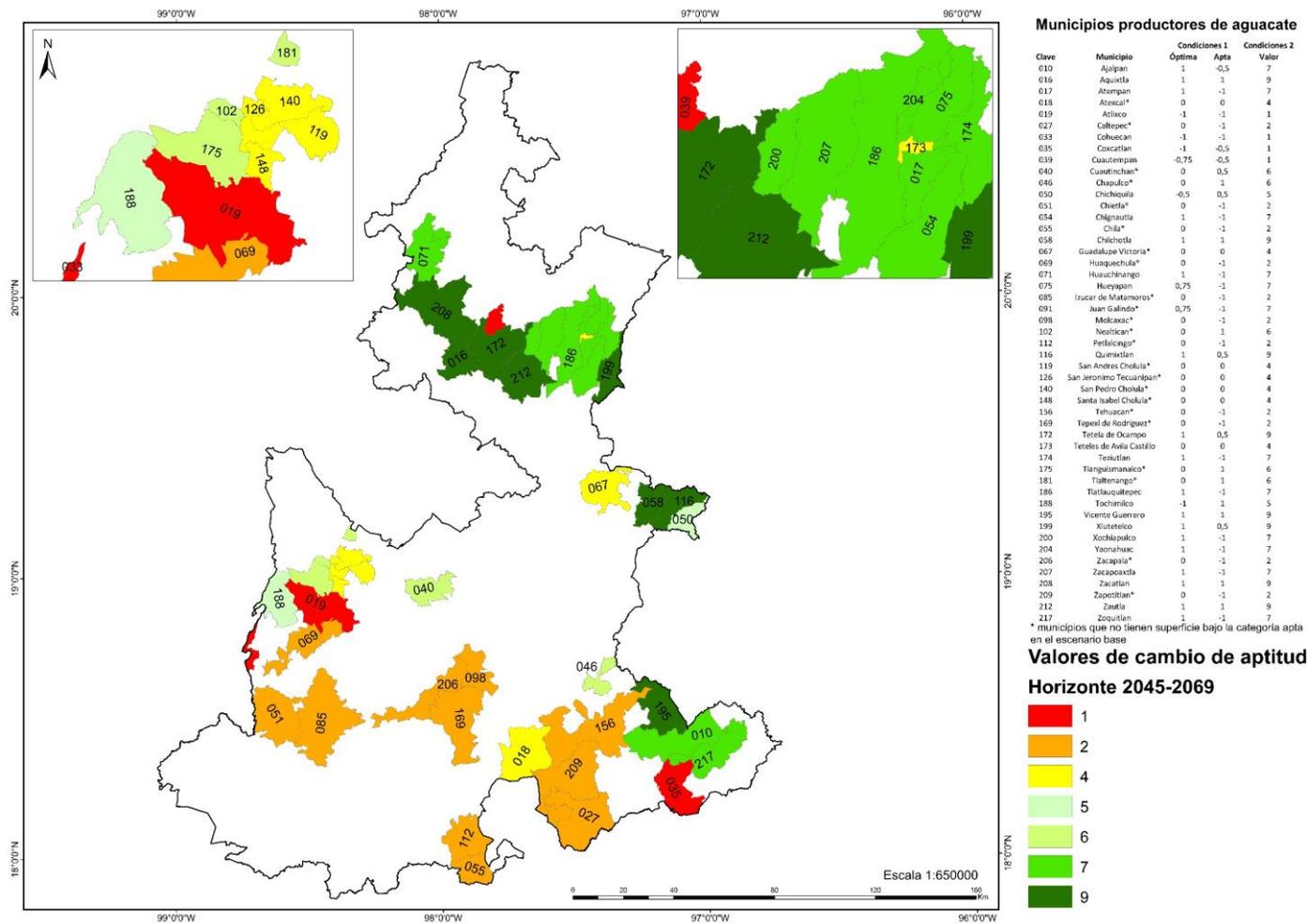


Figura 29. Valores de cambio de aptitud bajo para el horizonte 2045-2069. Fuente: elaboración propia.

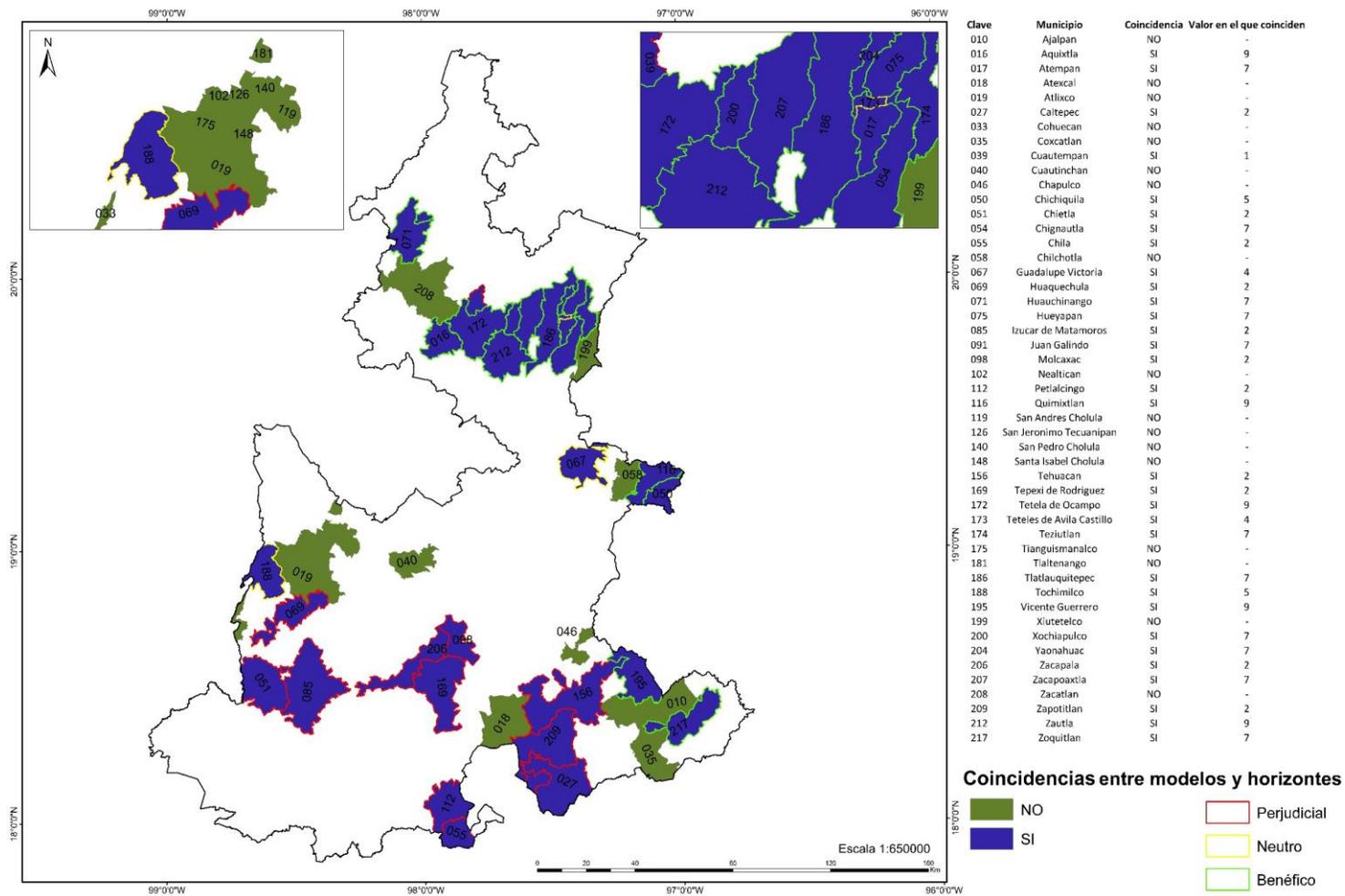


Figura 30. Coincidencias y diferencias entre valores de cambio de aptitud. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 3. Vulnerabilidad socioambiental ante el cambio climático en los municipios productores de aguacate en Puebla

3.1 Vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático

La vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático no sólo depende de las respuestas fisiológicas de las plantas que se traducen en rendimientos, sino que también se relaciona con la capacidad de los sistemas de producción socioeconómicos para contender con las variaciones en la productividad (Torres *et al.*, 2009). Son justamente las características de estos sistemas los que se abordan durante este capítulo.

Generalmente, la vulnerabilidad implica considerarla como: a) la sensibilidad y exposición de un sistema a presiones, estrés o disturbios (internos y externos); b) el estado del sistema respecto a cierto umbral de daño; y c) la habilidad del sistema para adaptarse a las condiciones cambiantes (Torres *et al.*, 2009). Estos aspectos los describen y adaptan Monterroso y colaboradores (2012) para estudios de vulnerabilidad agrícola de la siguiente forma:

Para el caso de la sensibilidad, entendida como el grado en el que un sistema es potencialmente modificado o afectado por un disturbio interno o externo, se asocian con las condiciones humanas y ambientales que pueden empeorar o disminuir los impactos de un determinado fenómeno. Son utilizados datos sociales, económicos y agrícolas para integrar esta dimensión de la vulnerabilidad.

La exposición vista como un grado de estrés climático sobre una unidad de análisis, es relacionada con registros de frecuencia de eventos extremos (sequías, inundaciones, etc.) y los cambios de temperatura y precipitación por variación climática y cambio climático. También se relaciona con problemas ambientales como contaminación y degradación de recursos, pérdida de biodiversidad, plagas, enfermedades, incendios, entre otros.

Para evaluar la capacidad de adaptación es fundamental la información correspondiente a las condiciones de vida como la tasa de alfabetización, organización de los productores, propiedad de la tierra, acceso a créditos, remesas, apoyos gubernamentales, o aquellos relacionados con el capital natural como superficie con bosques, reforestadas y recarga de acuíferos y son los que integran este componente de la vulnerabilidad, que en teoría reflejarían la capacidad de modificar las características o comportamientos en los

sistemas para enfrentar de una mejor manera o anticiparse a los factores que impulsan el cambio.

De manera específica, los estudios más recientes que abordan la vulnerabilidad de los productores de aguacate en México integran diversas variables en forma de indicadores como el de Ortiz y Ortega (2018) o los suelen robustecer con otros, como los de pobreza, marginación y desarrollo humano (Ortiz, Zamora y Bonales, 2018; Villanueva y Zepeda, 2018).

Al no tratarse de un cultivo esencial como lo son los cereales, las investigaciones de vulnerabilidad y cambio climático relacionadas con el aguacate suelen ser menores, sin embargo, se trata de un producto que pasó de ser una fruta exótica en otros países a uno cuyas exportaciones pueden llegar a superar incluso a las del petróleo como sucedió en 2016 y 2018 en México (El Universal, 2017; La Jornada, 2020).

El mayor consumo de aguacate es en fresco, pero también puede ser comercializado como producto secundario, otorgándole un valor agregado. No obstante, si se trata de un producto transformado, existen inconvenientes como el mantenimiento del estado óptimo de maduración, oxidación, pérdida de color, generación de sabores extraños y desgaste de la textura (Dorantes, Parada y Ortiz, 2004).

De acuerdo con las cifras del Sistema de Información Arancelaria Vía Internet [SIAMI] de la Secretaría de Economía [SE] de México, en 2019, se exportaron más de 1.2 millones de toneladas a 39 países. El principal mercado se encuentra en América, seguido de Asia y Europa (Figura 31), donde más del 70% del valor de las exportaciones proviene de Estados Unidos, mientras que Canadá y Japón provén el 7% y 6 % respectivamente. Otros países donde se exporta aguacate son Honduras, El Salvador, España, Países Bajos y el Reino Unido. Sin embargo, México se mantiene como el mayor consumidor de aguacate con 8 kg de consumo anual per cápita (SIAP, 2018), seguido de Estados Unidos con 3.6 kg y una media de 1.4 kg de los países de la Unión Europea, además, se pronostica un aumento en la demanda para años futuros, incrementando el interés principalmente en los países asiáticos (FAO, 2020).

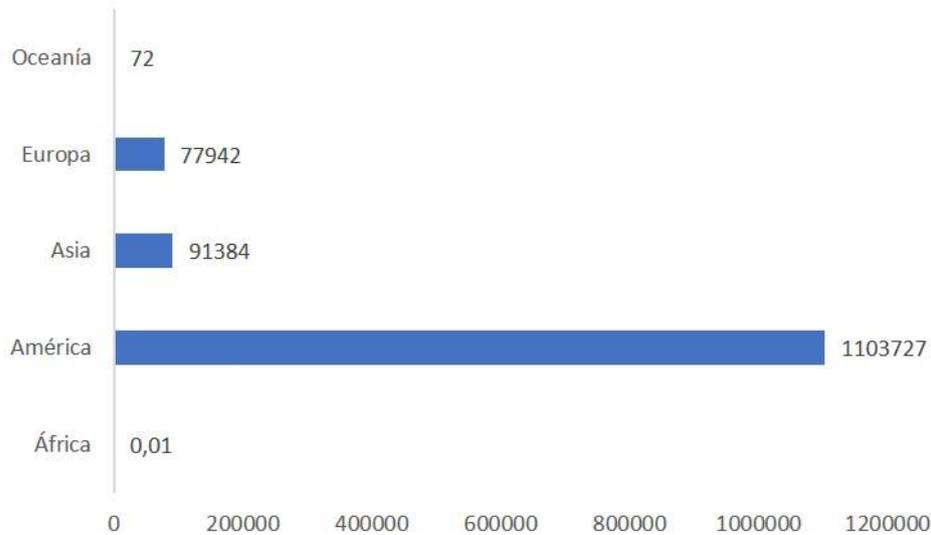


Figura 31. Exportaciones de aguacate por continente, 2019. Fuente: elaboración propia con datos del SIAVI.

De lo anterior surge la pregunta ¿están los productores preparados para un mundo en el que la demanda está en aumento? Aunado al contexto de una sociedad cada vez más urbanizada, con problemas de degradación de recursos, con menos espacios óptimos para los cultivos, donde el mercado, grandes empresas extranjeras y mediadores rigen el precio de los productos, junto a la poca organización de productores de pequeña escala que se enfrentan al reto de ser competitivos en el ámbito comercial y productivo, a la vez de disminuir el daño ambiental que la actividad agrícola provoca.

Si consideramos que el comercio se realiza principalmente en las áreas urbanas, donde crece constantemente la demanda del producto listo para su consumo casi al instante, la urbanización brindaría una oportunidad de oro para la agricultura. Sin embargo, al mismo tiempo plantea desafíos para millones de agricultores familiares en pequeña escala, ya que la mayor rentabilidad de los mercados puede dar lugar a la concentración de la producción en grandes explotaciones comerciales con el predominio de grandes elaboradores y minoristas en las cadenas de valor y la exclusión de los pequeños productores (FAO, 2017).

Al respecto, la concentración de la producción en grandes explotaciones comerciales es un modelo que se requiere evitar puesto que implica una serie de problemas relacionados con el deterioro de recursos, mayor gasto económico, aumento de la superficie, yuxtaposición con usos del suelo prioritarios y el fortalecimiento de los grandes

productores, empresas internacionales y mediadores y la consecuente marginación de los pequeños productores.

En este sentido, para garantizar que los productores en pequeña escala participen plenamente en la tarea de satisfacer la demanda urbana de alimentos, se necesitan medidas normativas que reduzcan los obstáculos que limitan su acceso a los insumos, fomenten la adopción de enfoques y tecnologías sostenibles desde el punto de vista ambiental, incrementen el acceso al crédito y los mercados, faciliten la mecanización agrícola, revitalicen los sistemas de extensión de cultivos, fortalezcan los derechos sobre la tierra, garanticen la igualdad en los contratos de suministro y refuercen las organizaciones de productores de pequeña escala (FAO, 2017).

Ahora bien, aun si se adoptan las estrategias que señala la FAO, existe el inconveniente de que el cambio climático agrave la situación agrícola y es que, la agricultura es extremadamente vulnerable al cambio climático; se esperan desde efectos directos por aumento de las temperaturas y cambios en los regímenes de precipitación, reflejados en cambios fenológicos y de aptitud, hasta los indirectos como los aumentos adicionales de costos para la producción de cultivos o la mayor volatilidad de los precios en el mercado, donde el aguacate no queda exento.

Ante lo expuesto, también surge la pregunta ¿qué tan vulnerables son al cambio climático los productores de los municipios en donde se produce aguacate? Para dar respuesta se ha planteado como objetivo principal del presente capítulo realizar un diagnóstico acerca de la vulnerabilidad socioambiental en los municipios productores de aguacate en Puebla a partir de los rasgos económicos y sociales de la población del sector agrícola, así como de su entorno que los sitúan ante la amenaza del cambio climático.

La primera etapa consistió en la construcción del modelo conceptual, dando respuesta a las preguntas ¿vulnerable a qué? ¿qué o quiénes son vulnerables? y ¿por qué son vulnerables? (Magaña, 2012) (Figura 32). Posteriormente, se llevó cabo lo sugerido por Hinkel (2011) quien propone que una vez definido el modelo conceptual le sigue la selección de las variables indicadoras y la función del indicador. Finalmente se realizaron los cálculos correspondientes para el índice de vulnerabilidad socioambiental por municipio.

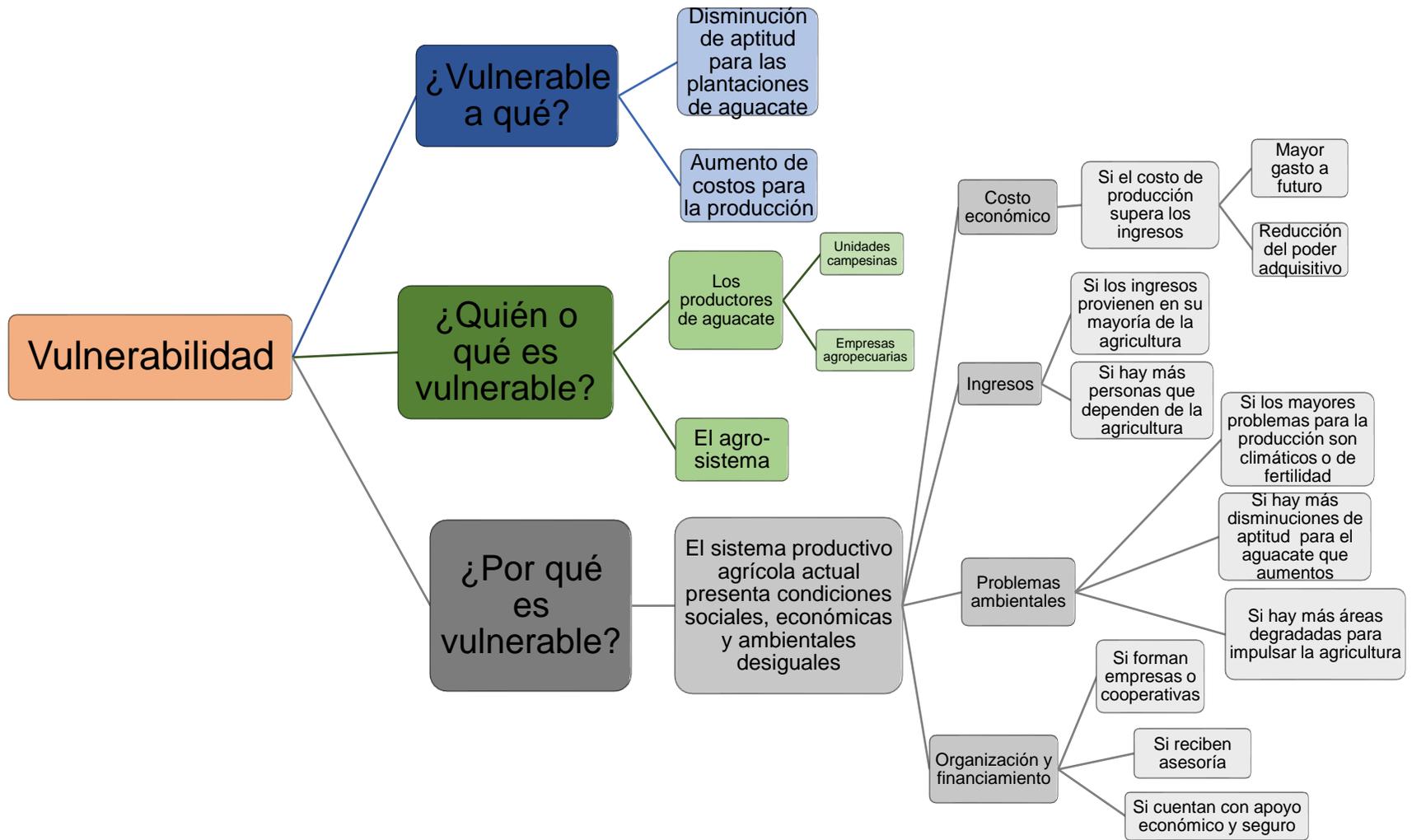


Figura 32. Modelo conceptual de la vulnerabilidad socioambiental de los productores de aguacate en Puebla. Fuente: elaboración propia.

3.2 Selección de variables e indicadores

La principal fuente de información provino del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal realizado por el INEGI (2007) así como de los resultados de la zonificación del aguacate bajo escenarios de cambio climático obtenidos en el capítulo 2 de esta investigación.

La selección de variables e indicadores empleados para la construcción del índice de vulnerabilidad socioambiental fue adaptada a partir de diversos trabajos (UNEA-FAO, 2011; Monterroso *et al.*, 2012; Ortiz y Ortega, 2015; Ortiz y Ortega, 2018; Ortiz, Zamora Torres y Bonales, 2018) (Tabla 16). Para cada indicador se prestó atención a que el valor máximo de cada variable reflejara la máxima severidad.

Tabla 16. Variables empleadas para el cálculo del índice de vulnerabilidad

Dimensión	Índice	Indicador	Tipo	Rango
Sensibilidad	Costo de producción	Propiedad de la tierra	Continua	0 - 0.42
		Uso de tractor	Discreta	0 - 4 098
		Insumos químicos	Continua	0 - 0.91
		Contratación de personal	Discreta	156 - 33 170
	Ingresos y dependientes	Origen de los ingresos	Continua	0.42 - 0.93
		Dependientes del agricultor	Discreta	318 - 21 368
Exposición	Limitantes ambientales	Problemática principal para la producción	Continua	0.22 - 0.96
		Cambio de aptitud por cambio climático	Discreta	1 - 6
		Superficie sin vegetación con problemas	Continua	0 - 0.77
Capacidad de adaptación	Organización y financiamiento	Sociedades y cooperativas	Discreta	0 - 95
		Asesoría para la producción	Discreta	0 - 205
		Seguro y financiamiento	Continua	0 - 0.13

Fuente: Elaboración propia adaptada de Owino, Olago y Wandiga (2020).

3.2.1 Índice Costo de producción

La inversión total destinada a la producción involucra las variables: propiedad de la tierra, uso de tractor, insumos químicos y contratación de personal para las labores agrícolas; éstos representan los principales componentes de costo de producción por hectárea para el aguacate (Franco *et al.*, 2018). En este sentido, los municipios que destinen los mayores gastos económicos para la producción resultarán ser los más vulnerables en un escenario donde los costos cada vez son mayores.

Propiedad de la tierra. El hecho de que los agricultores no sean dueños de la tierra implica que tengan que cubrir un costo; ya sea por medio de la remuneración económica o a través de su fuerza de trabajo, alquiler de herramientas, maquinaria o animales (si cuenta con ellos) o bien, con la repartición de las cosechas. Franco *et al.* (2018) indican que tan solo la renta de la tierra puede tener un costo de entre 30 000 y 60 000 pesos por hectárea. Una de las razones por las que los agricultores no son propietarios de la tierra la exponen Mendoza, Santiago y Hernández (2018) quienes mencionan que los propietarios de la tierra pueden ser adultos mayores que realizan una transferencia temporal de tierras como préstamo, renta o aparcería¹⁴ para que se hagan productivas.

Uso de tractor. Negrete y colaboradores (2013) señalan que las horas de trabajo de tractor por hectárea para el aguacate son de 5.4, valores altos en comparación con otros cultivos perennes como el café, caña y naranja que requieren entre 3 y 3.5 h/ha. Lo anterior indica un mayor costo económico por el uso de tractor, adicionalmente el combustible, aceite, lubricantes, grasas, mantenimiento y mano de obra (FAO, 2016; Carrasco *et al.*, 2018). Tan solo el gasto en combustible y lubricantes oscila entre 3 000 y 5 000 pesos por hectárea como lo mencionan Franco *et al.* (2018), además, el costo incrementaría si se requiere el uso de tractor y no se cuenta con uno.

Insumos químicos. Los gastos en insumos químicos por hectárea son los más importantes, porque en conjunto se requieren como mínimo 30 000 pesos para la producción comercial

¹⁴ Existen diferencias de forma y contenido en la operación del arrendamiento, la aparcería y el préstamo de la tierra. Cuando el productor elige rentar su activo permite temporalmente el usufructo y la administración de la tierra de su propiedad por una cantidad de dinero anual que es fijada por las partes. En el caso de una transferencia por aparcería, el productor recibe un porcentaje de la producción generada en la tierra, previamente acordado. Adicionalmente, el productor permite al aparcerero aprovechar su tierra, pero en la administración del recurso el dueño puede intervenir en la decisión respecto al cultivo a sembrar. En contraste, cuando el productor elige prestar su activo, generalmente no establece un acuerdo monetario o sobre la cantidad de producción que debe recibir el propietario; en este caso también puede existir acuerdo implícito o explícito, respecto a intervenir o no en la administración de la parcela (Hernández *et al.*, 2014, p. 348).

de aguacate (Franco *et al.*, 2018). Contrario a lo que se pensaría, la tecnología en la agricultura no siempre reduce la vulnerabilidad. Como mencionan Hernández *et al.* (2014) el riego, el uso de semillas mejoradas y fertilizantes pueden reducir la vulnerabilidad, sin embargo, estos avances también han sustituido las estrategias tradicionales de prevención de riesgos, tales como cultivos mixtos. Estos indicadores no solo representan un importante gasto económico en su adquisición, sino su relación con otros gastos secundarios como la contratación de personal o maquinaria para su aplicación (FAO, 2016). Además, hay que agregar los problemas ambientales relacionados con el uso excesivo de los productos químicos en la agricultura y la dependencia de los cultivos para el control de plagas con el objetivo de la obtención de mayores rendimientos.

Contratación de personal. Es un insumo esencial para llevar a cabo las labores agrícolas, especialmente en los países en vías de desarrollo donde se emplea gran cantidad de mano de obra debido a la baja tecnificación. Generalmente, los gastos en contratación de personal pueden representar más de la mitad de los costos de producción, aunque esta proporción puede variar significativamente dependiendo del producto básico producido, pero rara vez representan menos de un tercio de los costos totales (FAO, 2016). Para el caso del aguacate en Puebla, se estima que desde el establecimiento de la plantación hasta los primeros 3 años se gasta en personal aproximadamente 10 000 pesos mexicanos para alrededor de 16 ha (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2011), posteriormente el costo de personal varía entre 4 000 a 6 000 pesos (Franco *et al.*, 2018).

3.2.2 Índice de Ingresos y dependientes

Este índice lo integran el origen de los ingresos y los dependientes del productor. Los agricultores que tienen mayor dependencia de la agricultura y limitada capacidad de buscar otras alternativas de ingresos económicos son más vulnerables puesto que, pequeños cambios en el clima pueden tener impactos importantes, especialmente si depende en su totalidad la subsistencia de los agricultores y sus familias (Altieri y Nicholls, 2013). En otras palabras, la falta de diversificación en las fuentes de ingreso aumenta la vulnerabilidad y disminuye su capacidad de adaptación (Ibarrarán, 2014).

El origen del ingreso es fundamental desde el punto de vista económico porque influye en las decisiones del jefe de familia de permanecer o no en su unidad de producción. Este hecho se relaciona con la propiedad de la tierra; si es obligado a pasar cada vez menos

tiempo en su unidad de producción o incluso migrar, ésta pasa a ser dirigida por otros familiares, prestada, alquilada o en el peor de los casos se abandona (Ávila *et al.*, 2016).

3.2.3 Índice de Limitantes ambientales para la agricultura

El factor ambiental (problemas climáticos y edáficos para la producción agrícola, aptitud para el aguacate, cambios en las áreas con potencial para las plantaciones y degradación de recursos naturales) que constituye al índice de vulnerabilidad de los productores de aguacate al cambio climático es un conjunto de tres indicadores.

El primero de ellos es la problemática para la producción; en función de los datos analizados previamente, se notó que los tipos de climas y el suelo son los principales inconvenientes para la producción.

El segundo es el cambio de aptitud por cambio climático, donde se contempla únicamente la transición entre las categorías óptima y apta para las plantaciones de aguacate y que se describen en el capítulo 2 y Anexo 6.

Por último, la superficie sin vegetación con problemas para la agricultura se relaciona con la degradación de recursos naturales, por lo tanto, se tratan de superficies donde no se puede llevar a cabo la actividad agrícola (SAGARPA – FAO, 2012).

Por lo anterior, los altos valores de este índice indicarían que existe más vulnerabilidad, ya que aumentaría su exposición.

3.2.4 Índice de Organización y financiamiento

El índice de organización y financiamiento lo integran: sociedades y cooperativas, asesoría para la producción, y seguro y financiamiento. Estos tres componentes son comúnmente asociados como restrictivos para elevar la producción, que se reflejaría en mayores ingresos económicos y mejoras en la calidad de vida. Bazaldúa y García (2014) y Sangerman *et al.* (2014) coinciden en que los productores de aguacate en México requieren de organizaciones sociales, financiamiento y especialmente asistencia o asesoría para mejorar la productividad y aumentar la rentabilidad de las plantaciones.

En general las unidades de producción son frágiles, y particularmente la de los aguacateros son más deleznable. Los principales motivos por los que las unidades

económicas rurales (UER¹⁵, en adelante) tienen una endeble integración en la cadena productiva son por la baja capacidad de negociar las condiciones de venta o niveles de producción de sus bienes y por la desconfianza existente entre los actores de los diferentes eslabones de la cadena. Esto se debe a que existe una débil organización entre los productores, ya que el actuar de manera aislada no les permite manejar los volúmenes de insumos y productos, dejándolos fuera de un esquema eficiente de producción y comercialización (SAGARPA - FAO, 2012).

La importancia de conformarse en cadenas productivas radica en que permiten no sólo la integración al mercado de todos los eslabones de la cadena, sino también enfrentar los problemas de información, financiamiento e innovación tecnológica entre los agentes productivos y las instituciones públicas y privadas locales que trabajen alrededor de una cadena determinada (Piñones, Acosta y Tartanac, 2006).

Por otra parte, el asesoramiento tiene un efecto positivo para reducir la vulnerabilidad, ya que mejora las prácticas de manejo del cultivo (uso y aplicación de insumos, ya sean orgánicos o químicos, aumento de absorción de nuevas tecnologías, entre otros) y brinda información sobre el sector agrícola en general (integración en cadenas productiva, diversificación, etcétera). Lo anterior es un punto fundamental ya que se ha visto que en las UER donde se recibió capacitación o asistencia, el 76.5% continuó aplicando lo aprendido (SAGARPA - FAO, 2012).

En cuanto al crédito y financiamiento, en las UER de los distintos tipos de agricultura familiar (de subsistencia, transición, consolidada) se utilizó el crédito para la adquisición de insumos y en menor proporción para obtener bienes (SAGARPA - FAO, 2012).

En el caso de este índice, los valores máximos están asociados a menor vulnerabilidad, debido a que representan la capacidad de adaptación de los productores.

3.3 Cálculo del índice

El primer paso consistió en normalizar los datos. Fórmula (2):

$$VNx_1 = \frac{(x_1 - x_M)}{\sigma_X} \quad (2)$$

¹⁵ Unidad económica rural o pesquera es la persona física o moral, ligada o no a un predio, que desarrolla actividades agropecuarias, de pesca, acuícola y otras actividades productivas, industriales, comerciales y de servicios en el medio rural.

Donde:

VN_{x1} = valor normalizado de la variable

X_1 = valor de la variable

X_M = media de la serie

σX = desviación estándar de la serie

Posteriormente, se calculó el primer índice que se compone por las variables: propiedad de la tierra, uso de tractor, insumos químicos y contratación de personal para las labores agrícolas, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Costo para la producción (CP)} = PT + UT + IQ + PC$$

Donde:

$$\text{Propiedad de la tierra (PT)} = \frac{\text{superficie rentada} + \text{superficie a medias} + \text{superficie prestada} + \text{otros}}{\text{superficie total municipal}}$$

$$\text{Uso de tractor (UT)} = \text{Unidades de producción (UP) con tractor rentado} + \text{UP con tractor prestado}$$

$$\text{Insumos químicos (IQ)} = \frac{\text{superficie fertilizantes} + \text{superficie herbicidas} + \text{superficie insecticidas}}{\text{superficie total municipal}}$$

$$\text{Personal contratado (PC)} = \text{Total de hombres y mujeres contratados para labores agrícolas por municipio}$$

Posteriormente se estimó el índice de ingresos y dependientes a partir de la suma de dos indicadores:

$$\text{Ingresos y dependientes (IyD)} = OI + DE$$

Donde:

$$\text{Origen de los ingresos (OI)} = \% \text{ total de las UP con ingresos de las actividades agrícolas}$$

$$\text{Dependientes económicos (DE)} = \text{Total de hombres y mujeres que dependen del productor}$$

Una vez se calcularon los índices de costo de producción (CP) e ingresos y dependientes (IyD), se sumaron y se normalizaron los valores a una escala de 0 a 1 mediante la fórmula (3):

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3)$$

Donde:

x' = valor normalizado (de 0 a 1)

x = valor a normalizar

x_{min} = valor mínimo del conjunto de datos

x_{max} = valor máximo del conjunto de datos

El siguiente índice se refiere a los factores ambientales que limitan la producción agrícola, y la integran: problemática principal para la producción, cambio de aptitud por cambio climático y superficie sin vegetación con problemas para la agricultura. Se estimó mediante:

$$\text{Limitantes ambientales}(LI) = PA + SV + CA$$

Donde:

$$\text{Problemáticas ambientales (PA)} = \frac{\text{UP con problemas climáticos} + \text{UP con problemas de suelos}}{\text{UP totales por municipio}}$$

$$\text{Superficie sin vegetación con problemas (SV)} = \frac{\text{ensalitrada} + \text{erosionada} + \text{cubierta de agua}}{\text{total de superficie sin vegetación}}$$

Mientras que la variable de cambio de aptitud por cambio climático (CA) se construyó a partir de los valores de la Tabla 11 del capítulo 2. Se recategorizaron los datos para representar el grado de vulnerabilidad y se normalizaron con la fórmula (2).

Valores	Nuevos valores
1	6
2	5
4	4
6	3
7	2
9	1

Obtenido el indicador *Limitantes ambientales* (LI), se prosiguió a normalizar los nuevos valores a una escala de 0 a 1 con la fórmula (3).

Por último, el índice de organización y financiamiento compuesto por: sociedades y cooperativas, asesoría para la producción y seguro y financiamiento, se calculó y normalizó empleando las fórmulas correspondientes.

$$\text{Organización y financiamiento (OF)} = \text{SyC} + \text{AS} + \text{SyF}$$

Donde:

$$\text{Sociedades y cooperativas (SyC)} = \text{Total de UP que pertenecen a un grupo u organización}$$

$$\text{Asesoría para la producción (AS)} = \text{Total de UP que recibieron asesoría}$$

$$\text{Seguro y financiamiento (SyF)} = \frac{\text{UP con seguro} + \text{UP con crédito} + \text{UP con crédito y seguro}}{\text{total de UP por municipio}}$$

Con los índices ya estandarizados, se empleó la expresión que estima la vulnerabilidad mediante los componentes de sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación:

$$\text{Vulnerabilidad} = (\text{Sensibilidad} + \text{Exposición}) - \text{Capacidad adaptativa}$$

La suma de los índices costo de producción e ingresos y dependientes, representan a la sensibilidad, el índice de limitantes ambientales a la exposición y el de organización y financiamiento a la capacidad de adaptación. Los resultados se normalizaron nuevamente con la fórmula (3) para obtener valores de 0 a 1, y se agruparon los municipios por quintiles para obtener las categorías de muy alta a muy baja.

3.4 Descripción de las dimensiones que componen al índice de vulnerabilidad socioambiental

3.4.1 Sensibilidad

La distribución de la sensibilidad tiene una asociación similar a la normal, donde el 50% de los datos se concentra entre 0.2 - 0.5, muy cerca de la mediana, además, son más los municipios que tienen baja sensibilidad que los que tienen valores por encima de 0.6, y únicamente se presenta un caso extremo muy alto (Figuras 33 y 34).

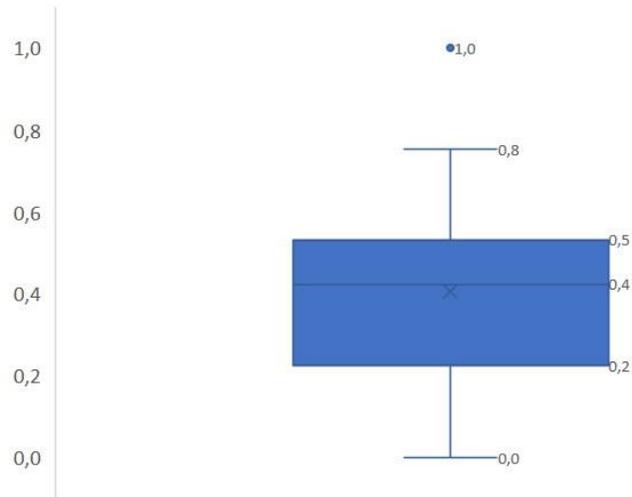


Figura 33. Diagrama de cajas de la dimensión "Sensibilidad".

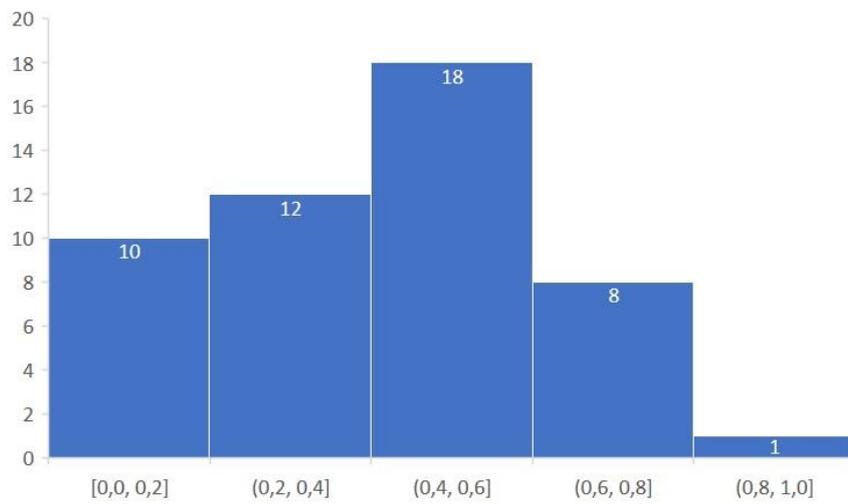


Figura 34. Histograma de la dimensión "Sensibilidad".

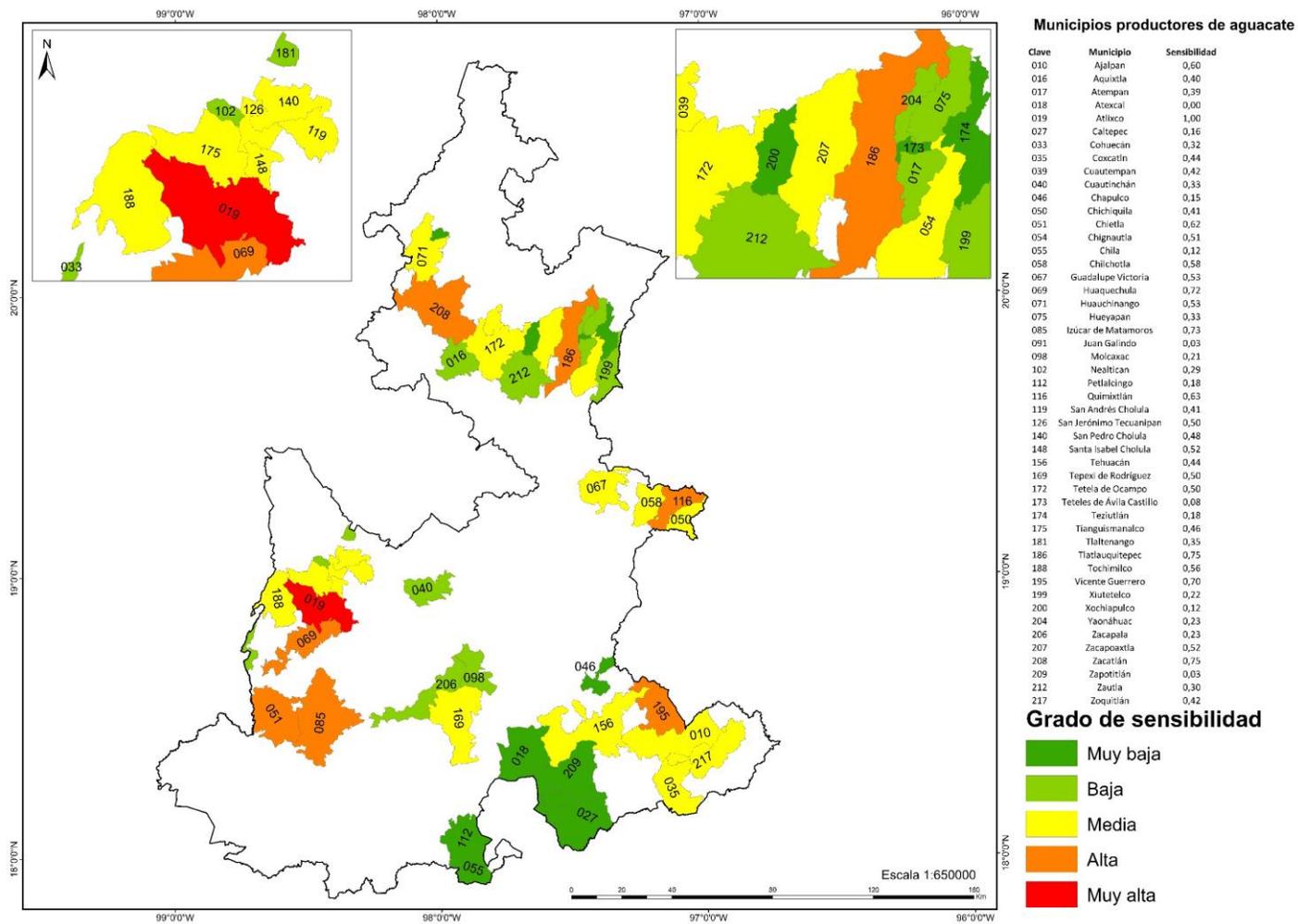


Figura 35. Grado de sensibilidad de los municipios productores de aguacate.

El municipio con el valor más alto es Atlixco, mientras que Tlatlauquitepec, Zacatlán, Izúcar de Matamoros, Huaquechula, Vicente Guerrero, Quimixtlán, Chietla y Ajalpan presentan un grado alto. Por otra parte, los municipios con grados más bajos son Atexcal, Juan Galindo, Zapotitlán y Teteles de Ávila Castillo (Figura 35).

La región oeste es en la que coinciden la mayoría de los municipios con niveles altos de sensibilidad, mientras que al este y sureste también hay semejanza pero con grados de medio a alto. Los municipios del centro al sur de la entidad son los que tienen los grados más bajos. Por último, existe una heterogeneidad en la región norte, por lo que no hay un patrón espacial definido.

3.4.2 Exposición

Se representa por el índice de limitantes ambientales para la producción agrícola. Los valores se concentran entre 0.2 – 0.5, con una mediana de 0.3 (Figura 36). De acuerdo con el histograma (Figura 37), la distribución de los valores está sesgada a la derecha, agrupándose en su mayoría cerca de la mediana (entre 0.2 y 0.4), por lo que los valores altos de exposición son los menos frecuentes.

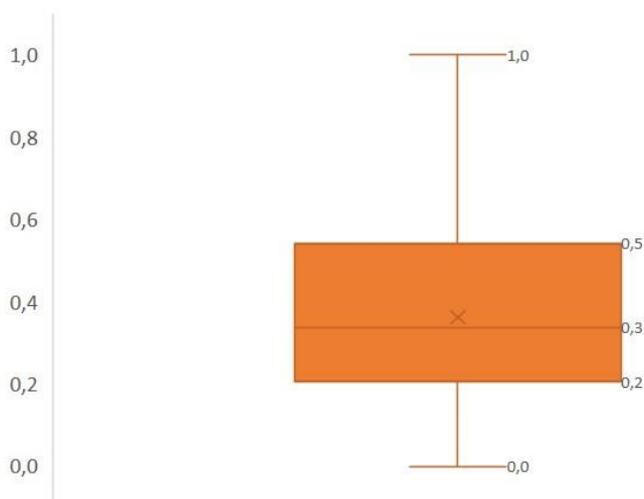


Figura 36. Diagrama de cajas de la dimensión "Exposición".

Únicamente el municipio de Cuautempan es quien presenta el valor más alto, seguido de San Andrés Cholula, Caltepec, Teziutlán, Molcaxac y Coxcatlán. Municipios como Yaonáhuac, Cohuecán, Hueyapan y Juan Galindo prácticamente tienen un bajo grado de exposición. La zona con niveles medios y altos se localiza al sur de la entidad; en las otras

áreas de distribución, los municipios productores de aguacate se agrupan con niveles bajos y muy bajos (Figura 38).

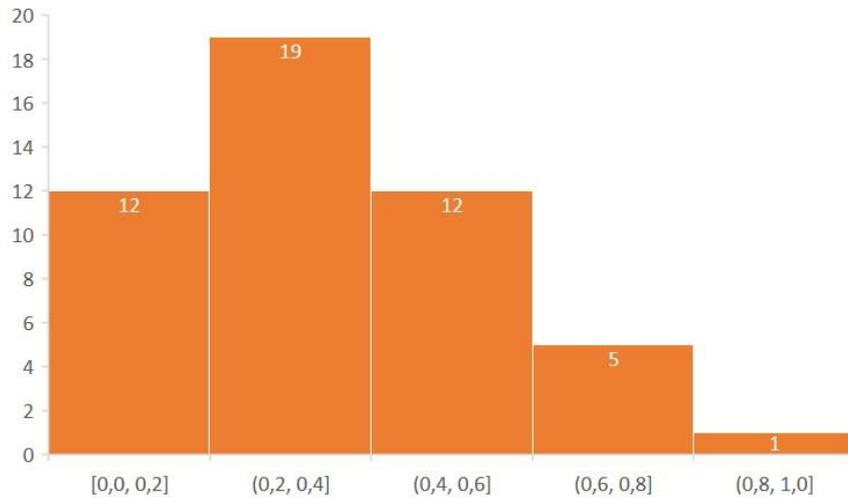


Figura 37. Histograma de la dimensión "Sensibilidad".

3.4.3 Capacidad de adaptación

En el caso de esta dimensión, los valores son pequeños, tanto que el 50% de los datos se agrupa entre 0 y 0.2, con presencia de varios datos atípicos (Figura 39). En función del histograma se puede notar que los datos se congregan hacia la derecha (Figura 40) lo que indica que la mayoría de los municipios no tienen una capacidad adaptativa que reduzcan la vulnerabilidad.

El municipio de Chietla es quien tiene la mayor capacidad de adaptación, seguido de Atlixco, Izúcar de Matamoros, Huaquechula, así como Tlatlauquitepec. Mientras que Coxcatlán, Zacatlán y Ajalpan presentan un grado medio. La región productora al oeste de la entidad es donde aparecen los mayores niveles para reducir la vulnerabilidad, mientras que al sur, sureste y al este, prácticamente la mayoría de los municipios no contarían con valores altos (Figura 41).

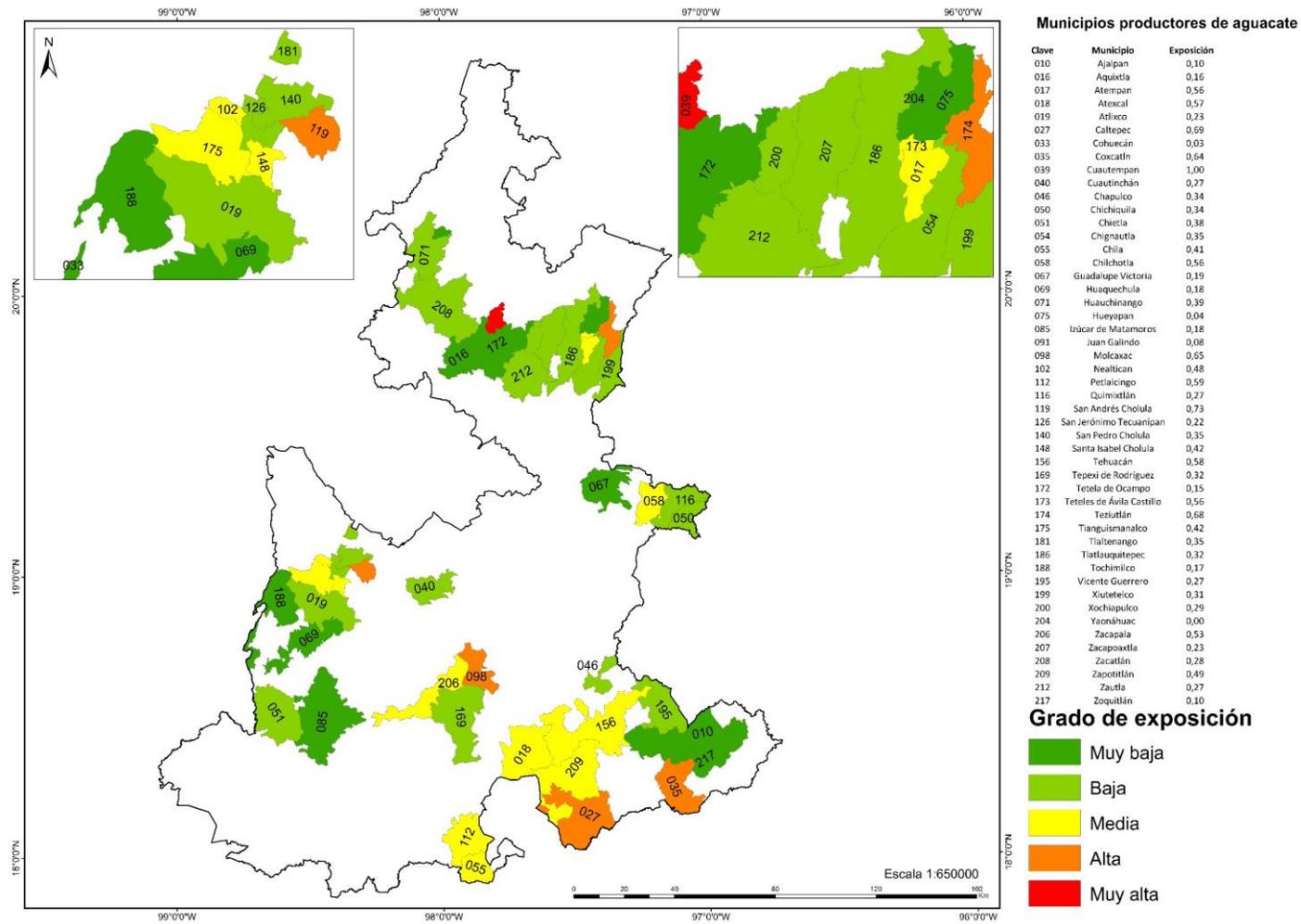


Figura 38. Grado de exposición de los municipios productores de aguacate.

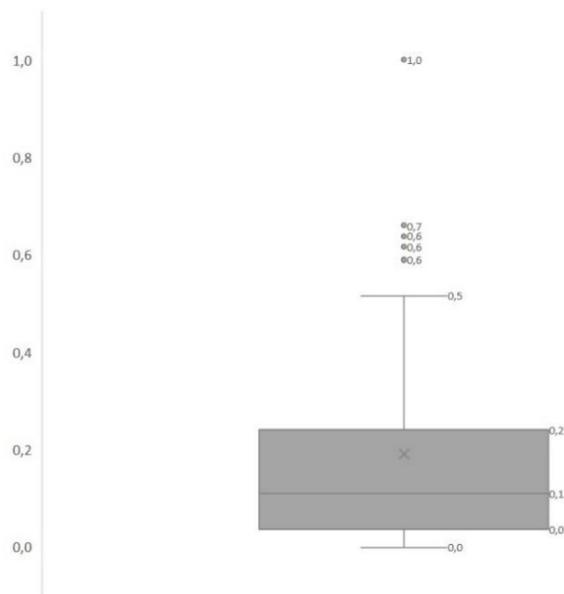


Figura 39. Diagrama de cajas de la dimensión "Capacidad de adaptación".

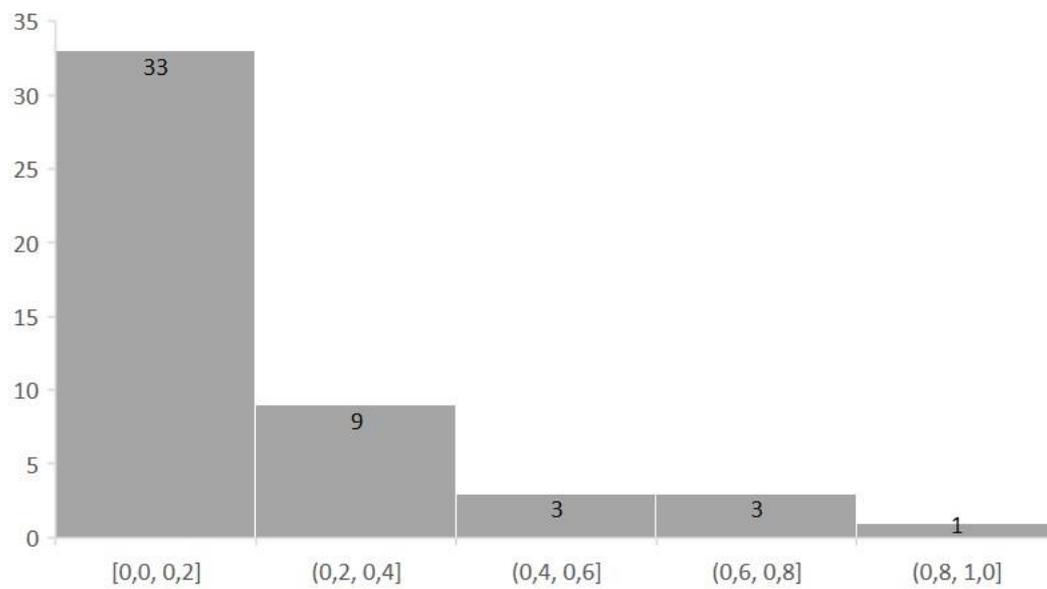


Figura 40. Histograma de la dimensión "Capacidad de adaptación".

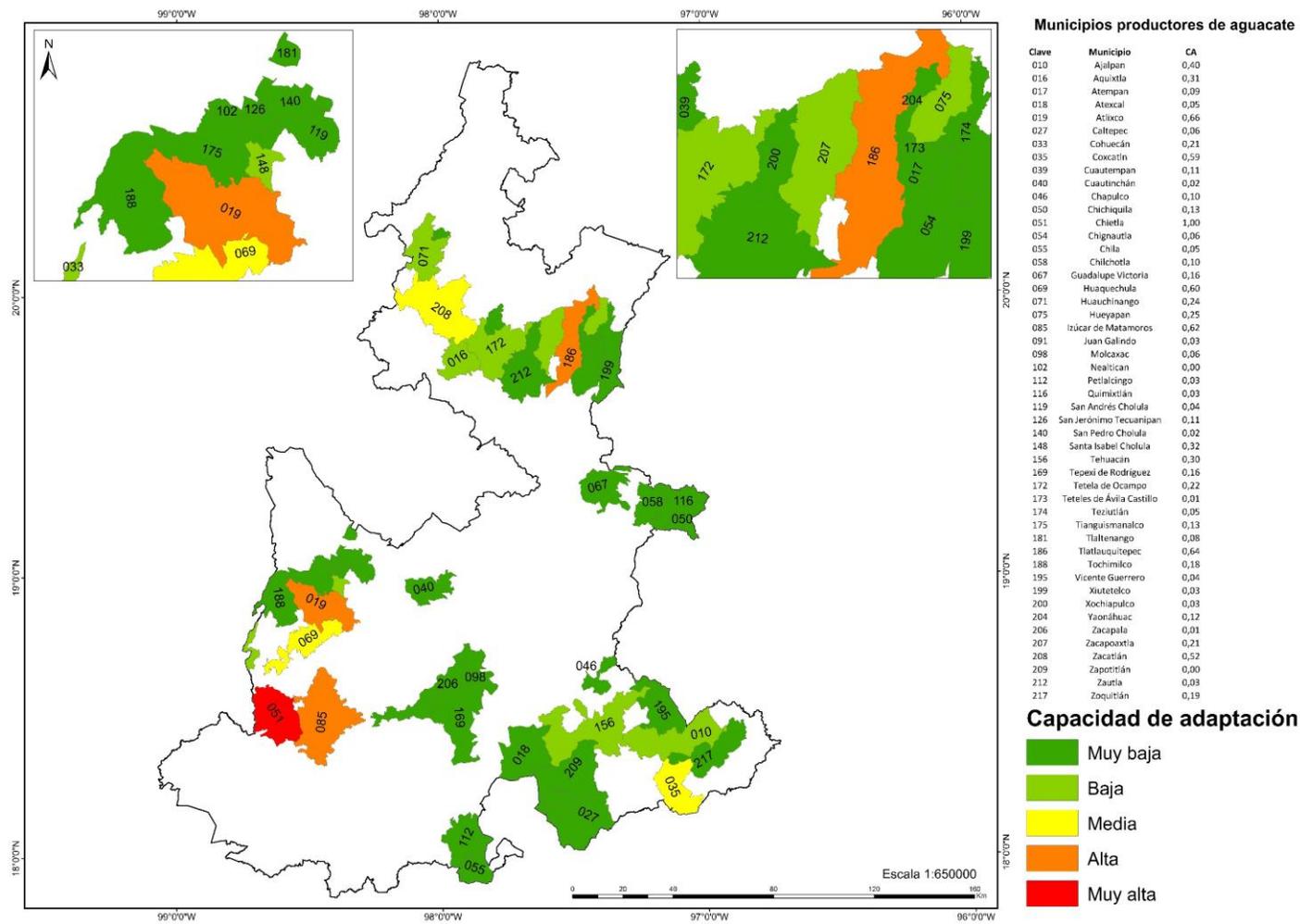


Figura 41. Capacidad de adaptación en los municipios productores de aguacate.

3.5 Vulnerabilidad socioambiental en los municipios productores de aguacate en Puebla

El índice de vulnerabilidad es el resultado de la suma de las dimensiones de sensibilidad y exposición menos la capacidad adaptativa. Los valores obtenidos se encuentran concentrados principalmente entre 0.3 y 0.6, cerca de la media que es 0.4, una disposición similar a la de las dimensiones de sensibilidad y exposición (Figura 42). En el histograma de frecuencias se puede notar que los valores tienen una distribución simétrica y dos valores que son los menos frecuentes (Figura 43).

A excepción de los municipios que se encuentran al este y oeste de la entidad, y que presentan grados de vulnerabilidad de media – alta, no hay un patrón espacial de distribución de la vulnerabilidad en los municipios productores (Figura 44).

A continuación, se describen las características de los municipios que se agrupan en cada una de las categorías. Si se requiere una revisión más detallada, se puede consultar el Anexo 8.

Muy alta

Los dos municipios con los mayores índices de vulnerabilidad son Cuatempan, al norte de la entidad y San Andrés Cholula al oeste. Son los más vulnerables debido a que tienen principalmente una mayor exposición y una capacidad de adaptación baja.

Por un lado, en Cuatempan el 64% de las unidades de producción tienen problemas de clima y suelo y el 77% de la superficie sin vegetación con degradación, mientras que existe una alta posibilidad de disminución de las condiciones óptimas y descenso de las aptas para el aguacate. En cuanto a la capacidad de adaptación esta es baja debido a que en las unidades de producción hay 5 que pertenecen a una sociedad o cooperativa, 51 recibieron asesoría y el 1 % cuenta con seguro o crédito.

Por otra parte, en San Andrés Cholula el 58% de las unidades productivas tienen problemas de clima y suelo y el 57% de la superficie sin vegetación está degradada, la posibilidad de cambio de aptitud de las mejores categorías para el aguacate es baja, sin embargo, solo 8 unidades de producción están organizadas, 11 reciben asesoría y del total de las unidades de producción en el municipio, ni una cuenta con seguro o crédito.

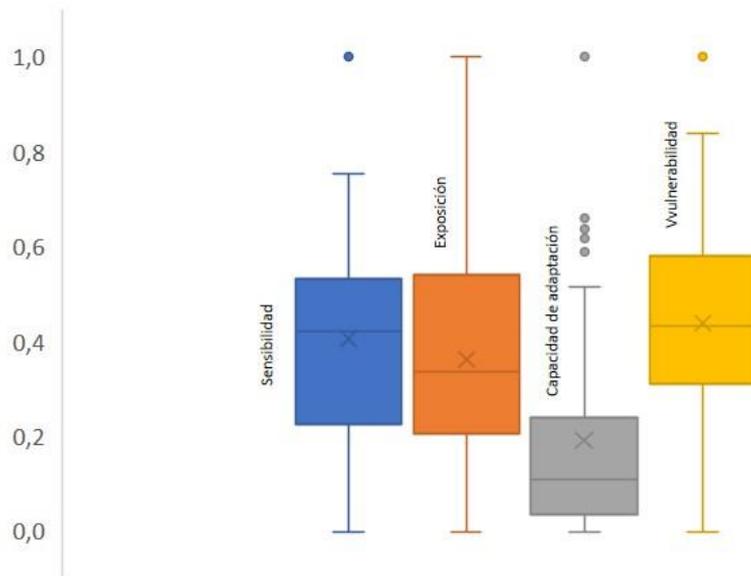


Figura 42. Diagrama de caja del índice de vulnerabilidad y sus componentes.

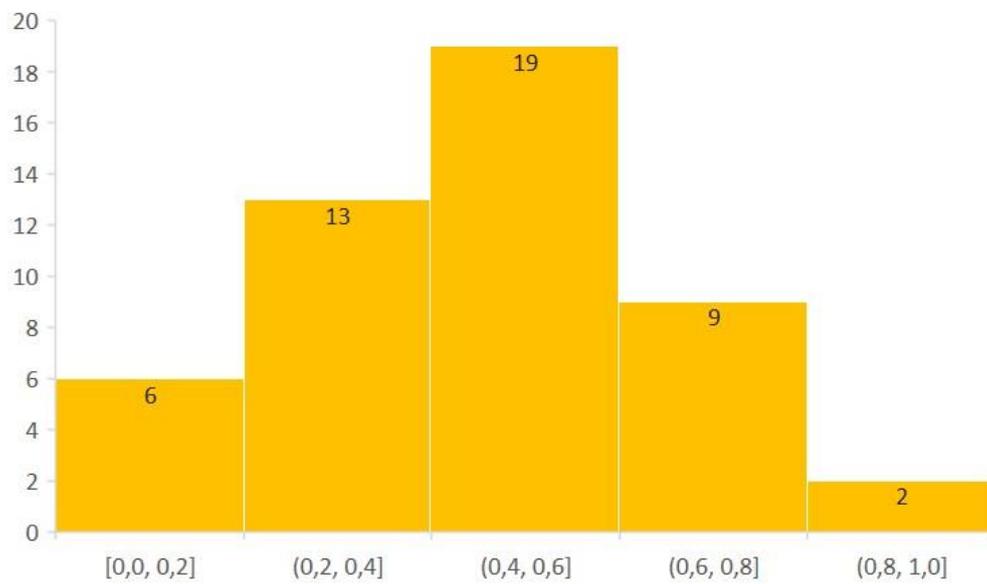


Figura 43. Histograma del índice de vulnerabilidad socioambiental.

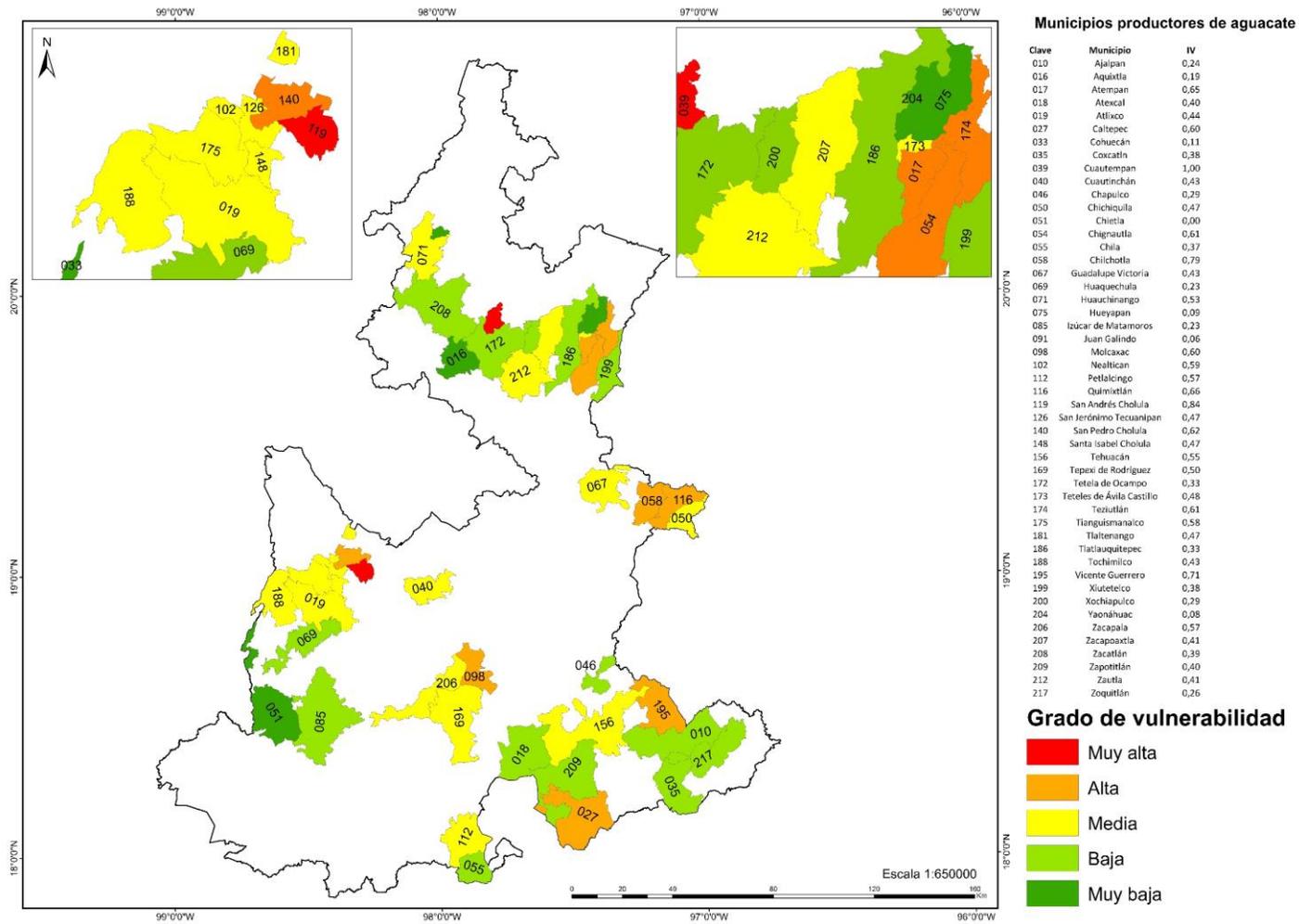


Figura 44. Grado de vulnerabilidad socioambiental en los municipios productores de aguacate.

Alta

Son nueve los municipios productores que presentan un alto grado de vulnerabilidad: al norte, Chignautla, Atempan y Teziutlán; al este Chilchotla y Chichiquila; al sureste Vicente Guerrero y Caltepec; al sur Molcaxac; y al oeste San Pedro Cholula. La causa por la que presentan un grado alto radica en los bajos valores de capacidad de adaptación.

Con excepción de Chignautla y Teziutlán, en el resto de los municipios entre el 1% y 6% no son dueños de la tierra. Por otra parte, solamente en Quimixtlán, Teziutlán y Chilchotla hay menos de 50 unidades de producción que utiliza tractores que no son suyos. El uso de químicos es moderado, ya que en sitios como Caltepec y Teziutlán no llega ni a 10% del uso pero en los otros siete, el promedio es del 50%. En Vicente Guerrero se contratan más personas para las actividades agrícolas que en cualquier otro municipio, mientras que en Caltepec tan solo se contratan 732 personas. Entre el 45% y 88% de los ingresos provienen de las actividades primarias mientras que los dependientes de los productores van de las 2 000 a 15 000 personas.

Entre el 6% y 90% de las unidades de producción presentan problemas de tipo climático y edáfico. En Teziutlán existe un importante porcentaje de degradación de las tierras sin vegetación, caso contrario en Quimixtlán y San Pedro Cholula. En cuanto al cambio de aptitud por cambio climático, no sucederán variaciones importantes, con excepción de San Pedro Cholula, Caltepec y Molcaxac donde existe una alta posibilidad de disminución de las condiciones óptimas y aptas para el aguacate.

Los bajos valores en la capacidad de adaptación en estos municipios han contribuido a que la vulnerabilidad se alta, y es que, en promedio son 11 unidades de producción las que se conforman en sociedades y cuentan con asesoría; el seguro y financiamiento es prácticamente nulo.

Media

Se trata del grado en el que se agrupan la mayoría de los municipios productores. Al norte, Huauchinango, Zautla, Zacapoaxtla y Teteles de Ávila Castillo; al este, Guadalupe Victoria y Chichiquila; en el centro, Cuautinchán; al sur, Zacapala, Tepexi de Rodríguez, Petlalcingo y Tehuacán; y al oeste Tlaltenango, San Jerónimo Tecuanipan, Nealtican, Santa Isabel Cholula, Tianguismanalco, Atlixco y Tochimilco.

Entre el 2% y 28% la tierra no es propiedad de los productores; el uso del tractor rentado o prestado en las unidades de producción es mayor que en las categorías muy alta y alta,

ya que van de 26 a 4 098; de igual manera, el uso de químicos en las áreas de cultivo es mayor, con rangos que van del 11% al 93%. El mínimo de personal contratado en estos municipios lo presenta Tlaltenango con 503 mientras que el más alto es Atlixco con 14 575. La agricultura provee entre el 44% y el 93% del origen de los ingresos y los dependientes económicos son menos en Teteles de Ávila Castillo con 731 que en Atlixco con más de 18 000.

En cuanto a los problemas relacionados con el clima y suelo, los municipios tienen una variación de entre 40% y 90% con este tipo de inconvenientes. La superficie sin vegetación con algún grado de degradación oscila entre el 1% y el 52%. En cuanto a la transición de aptitud, la mayoría de los municipios no tendrán cambios en las condiciones actuales, salvo Huauchinango, Zacapoaxtla y Zautla donde hay más posibilidades de que aumenten las mejores condiciones para el aguacate.

La capacidad de adaptación en esta categoría comienza a ser mayor en los municipios que la integran, lo que explica en parte que la vulnerabilidad sea moderada. A excepción de Nealtican, Petlalcingo, Zacapala y Teteles de Ávila Castillo, el resto presenta un promedio de 20 unidades productivas pertenecientes a alguna organización; entre 5 y 139 tienen asesoría y cuentan con seguro y crédito entre 1% y 4%.

Baja

Son 14 municipios de los 49 los que presentan una vulnerabilidad baja. En la parte norte, Zacatlán, Tetela de Ocampo, Xochiapulco, Tlatlauquitepec y Xiutetelco; al sureste, Chapulco, Atexcal, Zapotitlán, Ajalpan, Zoquitlán y Coxcatlán; al sur Chila; y al oeste Huaquechula e Izúcar de Matamoros. En la parte este y centro no se encuentran municipios bajo esta categoría.

La tierra que no es propiedad de los agricultores representa 1% a 29%; se utiliza el tractor prestado o rentado entre 19 y 2 890 unidades de producción; aproximadamente el 30% y 76% utilizan los insumos químicos, con excepción de Chapulco, Atexcal y Zapotitlán donde su uso es menor. Además, se suelen emplear una cantidad considerable de personas para las labores relacionadas con la agricultura; descartando a Atexcal y Zapotitlán quienes contratan menos de mil, el resto se encuentran entre las 1 000 y casi 22 000 personas. Aunque aún persiste un porcentaje importante de los ingresos que provienen de las actividades primarias, éste es menor que en las demás categorías, con un rango de entre 42% a 88%. En cuanto a los dependientes económicos, sucede que en

Tlatlauquitepec, Huaquechula, Zacatlán, Ajalpan, Tetela de Ocampo, Zoquitlán y Xiutetelco, dependen del agricultor entre 10 000 y 21 000 personas, mientras que en el resto entre 1 300 – 8 000, en otras palabras, son los municipios pertenecientes a esta categoría los que presentan mayores dependientes económicos.

Los problemas climáticos y edáficos de estos municipios ocurren entre 38% y 86% de las tierras para los cultivos. De la superficie que no cuenta con vegetación y tiene algún grado de degradación, los valores porcentuales suelen ser menores, de entre 1% y 42%. Los cambios de aptitud por efecto de cambio climático son contrastantes, por un lado, municipios como Tlatlauquitepec, Zacatlán, Ajalpan, Tetela de Ocampo, Zoquitlán, Xiutetelco y Xochiapulco tienen una buena posibilidad de aumento en las condiciones óptimas para el aguacate, por otro, Huaquechula, Izúcar de Matamoros, Chapulco, Chila y Zapotitlán se mantendrían las zonas óptimas con una posibilidad de disminución de las aptas, mientras que en Coxcatlán prácticamente se conservarían las condiciones actuales.

Como se ha mencionado, existen valores como la contratación de personal o el número de dependientes económicos que incrementarían la vulnerabilidad, entonces ¿por qué estos municipios no se posicionan en grados mayores de vulnerabilidad? La respuesta radica en la capacidad de adaptación.

El único municipio cuyas unidades de producción no pertenecen a alguna sociedad o cooperación es Zapotitlán, el resto, tienen entre 5 y 64. Prácticamente en estos municipios por lo menos 3 unidades recibieron asesoría, siendo Tlatlauquitepec con 205 unidades de producción quien encabeza esta lista. Por último, los municipios de Zoquitlán, Xiutetelco y Xochiapulco no cuentan con seguro o crédito, los demás tienen entre el 1% y 12 % de este apoyo.

Muy baja

Los municipios bajo esta categoría solamente se distribuyen en la región norte y oeste de la entidad. Al norte, Juan Galindo, Aquixtla, Yaonáhuac y Hueyapan; al oeste Cohuecán y Chietla. Las principales razones por las que estos municipios presentan un bajo grado de vulnerabilidad se deben a que la sensibilidad y exposición no son tan altas y cuentan con condiciones que favorezcan la capacidad de adaptación.

Entre el 2% y el 10% del total de la tierra no les pertenece a los agricultores de estos municipios; el uso de tractor prestado o rentado es mayor en Chietla, puesto que 3 004 unidades de producción lo utilizan de esta manera, en Aquixtla y Cohuecán entre 500 y

600 unidades lo emplean, mientras que Hueyapan y Yaonáhuac no llegan a 20. Juan Galindo es el único que no lo utiliza. Los insumos químicos llegan a aplicarse hasta en el 88% de las tierras en Cohuecán, en contraste, Hueyapan y nuevamente Juan Galindo su uso es casi nulo. El personal contratado oscila entre 1 000 y 8 500 personas, mientras que el origen de los ingresos en su mayoría proviene de las actividades agrícolas y los dependientes económicos van de los 3 000 a 7 500 personas.

Los problemas de clima y suelo son menores que en las demás categorías, ya que a excepción de Aquixtla y Juan Galindo, el resto no llega al 50%. Una situación similar sucede con las áreas sin vegetación, ya que únicamente en Chietla, Aquixtla y Hueyapan, el porcentaje degradado va del 15% al 47%. Para los efectos del cambio climático, hay más posibilidad de que se mantengan las condiciones óptimas y aumenten las aptas o se mantengan como ahora, con excepción de Chietla, donde pueden disminuir las áreas aptas pero mantendría las óptimas.

Las unidades de producción que se encuentran organizadas van de 8 a 95, y una proporción mayor reciben asesoría (entre 4 y 127). En cuanto al seguro y crédito, es en esta categoría donde se encuentran los mayores porcentajes del total de los municipios productores, siendo Chietla y Aquixtla los que encabezan la lista. Asimismo, en Hueyapan y Yaonáhuac también se cuenta con este apoyo y solamente Cohuecán y Juan Galindo no cuentan con él.

Discusión

El desarrollo de esta investigación se fundamentó en el análisis de las áreas agroclimáticas óptimas y potenciales, las alteraciones de aptitud por cambios en las variables climáticas en las plantaciones de aguacate, así como el grado de vulnerabilidad socioambiental de los productores ante el cambio climático en Puebla.

El primer objetivo consistió en identificar los requerimientos ambientales del aguacate, así como el riesgo y la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas ante el cambio climático. Al respecto, existe abundante literatura en cuanto a las necesidades de temperatura, agua (lluvia y riego), humedad, tipos de suelos y altitud, principalmente para las dos principales variedades comerciales (Hass y Fuerte). No obstante, debido a la complejidad fenológica del aguacate es necesario que se incrementen los datos fenológicos para fortalecer los estudios agroclimáticos. En este caso, se recurrió principalmente a lo propuesto en la literatura, dado que han sido producto de observaciones fenológicas confiables, una labor que tarda años, aun si se realizan modelos fenológicos como los sugeridos en diversas investigaciones (Rocha *et al.*, 2011; Romero, 2012; Tapia, Larios y Barradas, 2012; Reyes *et al.*, 2015; Salazar, Ibarra y González, 2018).

En cuanto a los estudios recientes relacionados con los impactos del cambio climático en el aguacate se encuentran los efectuados por Tapia *et al.* (2011); Álvarez *et al.* (2017); Queen (2018); da Silva *et al.* (2019); y Ramírez *et al.* (2019) que sirven de parámetro comparativo no solo para el aguacate, sino con otras especies frutales para entender las implicaciones del cambio climático en la agricultura (Schroth *et al.*, 2016; Craparo, 2017; Odeny *et al.*, 2019; Pérez y Granados, 2020).

El siguiente objetivo radicó en zonificar las áreas con aptitud agroclimática en Puebla. De inicio, era necesario tener alguna regionalización de los municipios que producen aguacate, por lo que el empleo de la correlación entre dos variables, en este caso, la superficie sembrada y rendimiento, permitieron agrupar a los municipios desde la perspectiva agrícola productiva. Se trata de una técnica que ha sido utilizada por Ortiz, Zamora y Bonales (2018) y Segundo (2018). Aunque se esperaban resultados con un patrón espacial definido que mostrara conglomeraciones de municipios contiguos con las mismas características de superficie y rendimiento, resultó una heterogeneidad en la entidad; a pesar de esto, se pueden identificar regiones más pequeñas, en especial, la que se encuentra al oeste integrada por los municipios de Atlixco, Tochimilco, Huaquechula

y Chietla donde se tienen valores por encima del promedio. Para el caso contrario, son los municipios al norte de la entidad los que sobresalen. Ahora, la cuestión a resolver era si los datos de superficie y rendimiento coincidían con las áreas con aptitud agroclimática para el aguacate, para lo cual se desarrolló la zonificación.

La evaluación multicriterio y el AHP han sido empleados para llevar a cabo zonificaciones de cultivos en combinación con los sistemas de información geográfica (Aguilar *et al.*, 2010; Rivera *et al.*, 2010; Sotelo *et al.*, 2016; Yalew *et al.*, 2016; Lanzelotti y Buzai, 2017; Chivasa, Mutanga y Biradar, 2019). Existen otras metodologías que también utilizan los SIG con el mismo propósito, como las que se valen de algoritmos para detectar nichos ecológicos (Campos, 2012; Ramírez, Morales y Townsend, 2018; Bunn *et al.*, 2019; Charre, Mas y Chang, 2019; Kipkemboi *et al.*, 2019). Sin embargo, la decisión de utilizar el primero radicó en que la ponderación de las variables que tienen mayor relevancia sobre otras se basa en la experiencia de expertos y la teoría, en contraste con los algoritmos que realizan a través del software la relación lógico-matemática de la presencia-ausencia en los píxeles. De cualquier manera, sería interesante en investigaciones futuras realizar una zonificación de las plantaciones bajo el enfoque de nicho ecológico en la entidad.

Ahora bien, los resultados derivados fueron los que se esperaban, puesto que se sabe que los requerimientos climáticos y edáficos del aguacate son similares a los de las especies de los bosques, principalmente las de pino-encino. En este sentido, la mayor distribución de las áreas óptimas se encuentra en la región de la sierra, al norte de la entidad. No obstante, contrastan con los datos de superficie y rendimiento, quienes demuestran que ambas se encuentran por debajo del promedio. La coincidencia más importante entre aptitud y superficie-rendimiento se encuentra en la parte oeste. Un aspecto relevante es que existe un 25% del territorio total de la entidad con características aptas para las plantaciones.

Los requerimientos ambientales fueron la base para la zonificación, pero era necesario incluir dos aspectos importantes para el aguacate: la yuxtaposición con usos del suelo prioritario y las heladas tardías. Estas dos limitantes para las plantaciones han sido incluidas en investigaciones relacionadas con la zonificación del aguacate, principalmente el cambio de uso del suelo de forestal a huertas en el estado de Michoacán (Bravo *et al.*, 2009; Garibay y Bocco, 2011; Segundo Vivanco, 2018; Cho, 2020). Lo anterior debido a que tan solo hasta el 2005 se decía que la tasa anual de pérdida era de

690 ha por año, el principal motivo: el establecimiento de las huertas de aguacate (Garibay y Bocco, 2011). Esta situación podría suceder en los municipios productores en Puebla, puesto que cada vez es más atractivo este producto. Sin embargo, al contar con herramientas para la planificación agrícola como las que aquí se presentan, donde se tiene un primer acercamiento hacia las áreas potenciales para el cultivo, se pueden evitar o reducir estos problemas. En este tenor, del total de superficie óptima en la entidad, más del 50% no se encuentra bajo uso del suelo prioritario mientras que bajo la categoría apta, tan solo el 22% tiene restricciones de uso del suelo, es decir, se cuenta con superficie aceptable para llevar a cabo la actividad sin el problema que representa la conversión de uso del suelo. Los municipios como Tepexi de Rodríguez y Zacapala en el centro-sur, así como Atlixco, Huaquechula, Tochimilco y Chietla son los más favorecidos, ya que sus superficies prácticamente no coinciden con bosques.

En cuanto a las heladas tardías, los resultados dan cuenta de que prácticamente la posibilidad de ocurrencia de este fenómeno es hasta el mes de febrero, disminuyendo posteriormente en cuanto a su frecuencia y probabilidad, siendo Guadalupe Victoria el que tiene mayor riesgo, porque que se conjuga con etapas fenológicas sensibles al frío. La inclusión del riesgo por helada para el aguacate ha sido poco abordada como un criterio para la zonificación, aunque se encuentran estudios como los de Gutiérrez *et al.* (2010) y da Silva *et al.* (2019) donde si se integra, pero también sería necesario fortalecer los estudios de zonificación con otro tipo de riesgos como la sequía, debido a que forman parte de la percepción de riesgo entre los productores de aguacate (Pinilla y Briones, 2016).

Tomando en cuenta tanto los datos de superficie, rendimiento, así como los requerimientos y limitantes ambientales, sobresalen municipios en los que existen áreas potenciales para impulsar la producción, especialmente los que se localizan en el centro-sur como Tepexi de Rodríguez y Zacapala y al oeste, como Atlixco, Huaquechula, Tochimilco y Chietla. El caso contrario sucede principalmente en Guadalupe Victoria, localizado al este de la entidad. Sin embargo, la información presentada no se limita a estos sitios; puede servir de inicio para identificar áreas potenciales óptimas sin restricciones en los que no producen aguacate actualmente, como los municipios que se localizan en la franja de aptitud central del estado.

La labor de identificar las áreas potenciales para el aguacate en Puebla implicó también si estas se mantuviesen, aumentarían o se reducirían bajo escenarios y modelos de cambio

climático, y es justamente el tercer objetivo de este trabajo: reconocer las transiciones de aptitud bajo estas perspectivas.

Los escenarios y modelos empleados han sido trabajados previamente por instituciones en México para que sirvan de insumo en estudios de cambio climático (Fernández *et al.*, 2015). Se escogieron dos periodos de tiempo para contrastar los cambios a futuro cercano y mediano, así como el empleo de tres modelos bajo dos escenarios para identificar coincidencias y variaciones espaciales. Por otra parte, la decisión de analizar los datos como cambio de aptitud y no por alteraciones de las temperaturas o precipitaciones radicó en que de la primera manera se incluyen los datos no climáticos (suelos y altitud) que difícilmente cambiarían para esos periodos de tiempo. Este tipo de metodología no se ha replicado en algún estudio similar del aguacate, ya que generalmente se suele hacer de la segunda forma (Tapia *et al.*, 2011; Ortiz y Ortega, 2015; Álvarez *et al.*, 2017).

El trabajar con tres modelos de cambio climático, dos horizontes, cinco categorías de aptitud para más de 200 municipios dificultó la presentación, integración y análisis de la información. A pesar de ello se buscó la manera de sintetizarlo lo mejor posible, donde la cartografía fue parte esencial para lograrlo. De esta manera se llegó a los cuatro principios donde se enuncia que en general, hay más posibilidad de cambio hacia una categoría inferior de aptitud que una transición favorable.

Lo obtenido muestra que prácticamente para los tres modelos en los dos horizontes, en la región oeste, las condiciones óptimas se verán reducidas. Mientras que en la franja óptima de la región norte aumentaría, pero con un deslizamiento con dirección hacia el sur. La franja apta que va con dirección oeste-sureste también sufriría un desplazamiento en su conjunto hacia el norte. Asimismo, existen coincidencias para las áreas no aptas, las cuales se incrementarían, especialmente en la región suroeste, ocupando las zonas que antes eran poco aptas, y estas a su vez, tomando el sitio de las que contenían condiciones medias; en otras palabras, se esperaría una disminución de las mejores condiciones. En un estudio reciente Charre, Mas y Chang (2019) señalan que para el año 2050, bajo tres escenarios y diez modelos de cambio climático, la pérdida de superficie para el establecimiento de cultivos de aguacate en México para el escenario más optimista (RCP2.6) será de 79.4% y el más pesimista (RCP8.5) de 87.6%.

Como se indicó en la idea anterior, la región oeste es la que tendría una disminución de las áreas con las mejores condiciones, es así que municipios como Atlixco y Tochimilco

se verían afectados, sin embargo, no quiere decir que pierdan todas sus áreas óptimas; lo que sucedería es que se convertirían en aptas y medias.

Hablar de cambio climático y agricultura involucra necesariamente susceptibilidad, no solo de las plantas y de los espacios donde se lleva a cabo la actividad, sino de quiénes la realizan. En este sentido, el último objetivo fue estimar la vulnerabilidad socioambiental en los municipios productores de aguacate ante el cambio climático.

Como menciona Magaña (2012), estimar la vulnerabilidad es una labor que requiere de la experiencia y conocimiento del campo del investigador para generar modelos conceptuales, que generalmente evolucionan hacia modelos cuantitativos, y es en este punto donde toman relevancia los indicadores.

Los indicadores empleados en esta investigación para la estimación del índice de vulnerabilidad socioambiental son apropiados puesto que reflejan condiciones de las diferentes dimensiones que influyen en el grado de susceptibilidad del sistema agrícola. El enfoque teórico para abordar la vulnerabilidad desde los componentes de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación también ha sido oportuno, puesto que ha sido utilizado en diversas investigaciones con resultados favorables (Monterroso *et al.*, 2012; Ortiz y Ortega, 2015; Ortiz, Zamora y Valencia, 2018).

Uno de los limitantes más importantes para esta investigación fue la disponibilidad de datos actualizados. Desafortunadamente, el último censo agrícola fue el de 2007 y no se han vuelto a obtener datos desde esa fecha, por tal motivo, al no contar con otra fuente de información oficial con datos municipales, difícilmente se pueden integrar a esta escala de análisis otros aspectos que influyen en el grado de vulnerabilidad socioambiental como el manejo de cultivos o la percepción del riesgo (Pinilla y Briones, 2016). A pesar de lo anterior, los datos e información utilizada son importantes puesto que se requería elaborar un diagnóstico de vulnerabilidad de los productores de aguacate como se han llevado a cabo en otros lugares de producción (Ortiz, Zamora y Valencia, 2018; Villanueva y Zepeda, 2018; Ouma *et al.*, 2019). Además, la metodología empleada puede ser replicada para otros cultivos de la entidad, mientras que los resultados servirán como un primer acercamiento exploratorio de la relación entre el productor de aguacate, la vulnerabilidad y el cambio climático.

Los resultados mostraron que la mayoría de los municipios se agrupan en valores cercanos a la media para los componentes de exposición y sensibilidad, mientras que para la

capacidad de adaptación son más frecuentes los valores bajos, por lo que el índice de vulnerabilidad socioambiental tuvo valores cercanos a la media. Asimismo, existe una heterogeneidad de distribución espacial del grado de vulnerabilidad en estos municipios.

Un aspecto para resaltar es que los municipios con el grado más alto de vulnerabilidad no sobresalen en cuanto a superficie sembrada actual, rendimiento y áreas potenciales. En este tenor, de los que sí resaltan en las condiciones anteriores, solamente tres presentan un grado medio (Atlixco, Tochimilco y Tepexi), mientras que el resto tienen grado bajo (Huaquechula e Izúcar de Matamoros) y muy bajo (Chietla).

Aunque no se ponderaron los valores, se puede notar la relación y el peso de la capacidad adaptativa con la vulnerabilidad. Atlixco es buen ejemplo de ello, porque a pesar de tener valores altos de sensibilidad y exposición, cuenta con capacidad adaptativa suficiente como para que el grado de vulnerabilidad sea medio. Incluso en los municipios con los menores grados de vulnerabilidad se evidencia, como en Chietla, que cuenta con grados de sensibilidad y exposición importantes, pero la capacidad de adaptación es la más alta de los 49 municipios productores. Esto indica lo importante de implementar medidas que favorezcan las capacidades de los productores.

Pero también, será necesario tener presente lo que han sugerido Torres *et al.* (2009) y Magaña (2012), que la vulnerabilidad *per se* no es reflejo de impactos, pues estos surgen de considerar la probabilidad de que se presente el evento al cual es vulnerable; es una cualidad dinámica que puede ser alterada gradual o repentinamente por cambios en las condiciones sociales o biofísicas y la adaptación a estas condiciones cambiantes puede modificar la vulnerabilidad del propio sistema. Derivado de lo anterior, se puede sugerir que en investigaciones futuras se incluya la probabilidad de algún riesgo, o bien parámetros de umbrales de daño.

Como punto final a debatir, en esta investigación se han presentado elementos suficientes como para impulsar el aguacate desde un enfoque sostenible, en el sentido de que estarán en los mejores sitios donde la demanda de insumos externos sea mínima y donde la vulnerabilidad de los productores pueda ser minimizada o mitigada mediante la integración de estrategias de adaptación. Y es que, la intención no es que se repitan situaciones como las que sucedieron en otros estados como en Michoacán donde el cultivo de huertos de aguacate trajo efectos positivos pero fueron más los negativos. Como mencionan Garibay y Bocco (2011) entre los positivos destacó el incremento de ingresos en la región por lo bien cotizado del producto y el aumento de servicios en torno a la

actividad, como empresas de fertilizantes e insecticidas, sistemas de irrigación, servicios agronómicos y la creación de empleos temporales. No obstante, las grandes ganadoras de la actividad fueron connotadas familias ubicadas sobre todo en la ciudad de Uruapan, que controlaron, además de importantes áreas de producción, la venta de insumos, el empaque y comercialización de la fruta en el mercado internacional y nacional. Otros efectos negativos fueron la fragmentación de tierras comunes con objetivo de privatización, distanciamiento económico y denotación de clase entre aguacateros con campesinos que no cultivan aguacate.

En este caso, el escenario idóneo involucraría la participación del grande (> 15 ha), mediano (6 – 15 ha) y pequeño productor (< 5 ha), sin que éste último quede marginado. Hace unos años, Echánove (2008) ya señalaba que el producto que se exportaba había sido dominado por los medianos y grandes productores (más del 60%), situación que contrasta con otros estados más similares al de Puebla, como el estado de México, donde predominan los pequeños productores que poseen entre 1 y 5 ha (Rubí *et al.*, 2013). La baja participación de los pequeños productores se relaciona con el hecho de que su nivel económico y el estado de las huertas les puede significar que no cumplan con los requisitos de calidad para la exportación, aunado a la descapitalización, falta de acceso a créditos y asesoría técnica, por ello, solo pueden abastecer al mercado interno y muchas veces no entregan su fruta a empacadoras sino a intermediarios. De tal manera que los principales beneficiados son las empacadoras extranjeras, seguido de las mexicanas, grandes y medianos productores, y al final los pequeños productores y los jornaleros, pero además, existen también otros perdedores en el auge exportador: el medio ambiente y los consumidores nacionales (Echánove, 2008). Otro factor a considerar lo abordan Rubí y colaboradores (2013) quienes señalan que los productores de aguacate en el estado de México, así como en Nayarit, Michoacán y Morelos, tienen un grado de vulnerabilidad mayor porque, además de las condiciones sociales, agrícolas y económicas, la tendencia de producción se enfocó a una sola variedad (Hass) por las características de ésta (adaptabilidad, calidad del fruto, fácil comercialización, aceptación en el mercado, etc.) lo que los hace más susceptible a problemas fitosanitarios y también favorece la erosión de recursos genéticos, puesto que la propagación se sigue manteniendo a través de injertos.

Lo anterior reforzaría la idea de evitar el impulso de las grandes extensiones de monocultivo de aguacate y permitir la inclusión y práctica de sistemas agroforestales por

ejemplo, ya que se buscaría soslayar la dependencia de un solo producto, impulsar estrategias de manejo del cultivo más equilibradas con los recursos, así como el aumento de la resiliencia ante riesgos hidrometeorológicos y de cambio climático (Montiel *et al.*, 2008; Montagnini *et al.*, 2015; GIZ, 2017; Deheuvels, 2017; Burbano, 2019).

Conclusiones

La metodología empleada es completa porque integra espacialmente variables explicativas de carácter biológico como la fenología de la planta; ambientales, expresados en las necesidades del aguacate y en sus principales limitantes actuales y a futuro; y sociales, económicos y agrícolas para estimar la susceptibilidad a perturbaciones en el sistema. Además, incluye métodos y herramientas que la robustecen. Estas características permiten que pueda ser replicable para otro tipo de plantaciones, cultivos y contextos socioeconómicos a diversas escalas.

En el estado de Puebla se encuentran condiciones físico-geográficas y socioeconómicas suficientes como para incentivar y fortalecer la producción del aguacate. Especialmente, la región oeste, conformada por municipios que actualmente producen y sobresalen a nivel municipal; es la región que presenta los elementos que la hacen más rentable, sin embargo, se tiene el riesgo de que las áreas óptimas se vean reducidas por efecto de cambio climático, así como grados de vulnerabilidad medios y bajos que podrían agravarse si no se toman estrategias que favorezcan la capacidad de adaptación.

Es pertinente profundizar en la investigación con datos de fuentes primarias y a una escala más detallada para lograr una planificación agrícola que favorezca e integre a todos los eslabones de la cadena productiva del aguacate.

Bibliografía

- Achour, Yacine; Boumezbeur, Abderrahmane; Hadji, Riheb; Chouabbi, Abdelmadjid; Cavaleiro, Victor and Bendaoud, El Amine. (2017). Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(8), 1-16.
- Aguilar Rivera, Noé; Galindo Mendoza, Guadalupe; Fortanelli Martínez, Javier y Contreras Servin, Carlos. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 144-154.
- Alcantar Rocillo, J. J. (2009). Requerimientos agroecológicos. En V. M. Coria Avalos. (Ed.), *Tecnología para la producción de aguacate en México. Libro técnico. Núm. 8* (págs. 17-27). Uruapan, México: SAGARPA-INIFAP.
- Alcantar Rocillo, Juan José y Muñoz Flores, Hipólito Jesús. (2012). Factores limitantes climáticos y altitudinales. En G. Chávez León, L. M. Tapia Vargas, M. Bravo Espinosa, J. T. Sáenz Reyes, H. J. Muñoz Flores, I. Vidales Fernández, . . . y M. C. *Impacto del uso de suelo forestal a huertos de aguacate* (págs. 75-80). Uruapan: INIFAP.
- Alcaraz, M. L. and Hormaza, J. I. (2011). Influence of physical distance between cultivars on yield, outcrossing rate and selective fruit drop in avocado (*Persea americana*, Lauraceae). *Annals of Applied Biology*(158), 354-361.
- Altieri, Miguel A. y Nicholls, Clara. I. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas. En M. A. Altieri (Ed.), *Agroecología y cambio climático. Metodologías para evaluar la resiliencia socio-ecológica en comunidades rurales* (págs. 7-20). Lima: REDAGRES-CYTED-SOCLA.
- Alvarado Vázquez, M. A.; Foroughbakhch Pournavab, R.; Jurado Ibarra, R. E. y Rocha, A. (2002). El cambio climático y la fenología de las plantas. *Ciencia UANL*, 5(4), 493-500.
- Álvarez Bravo, A.; Salazar García, S.; Ruiz Corral, J. A. y Medina García, G. (2017). Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate Hass en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(19), 4035-4048.
- Arias, Francisco; Montoya, César y Velásquez, Oscar. (2018). Dinámica del mercado mundial de aguacate. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*(55), 22-35. Obtenido de <http://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/994/1442>
- Arpaia, M. L.; Fetscher, A. E. and Hofshi, R. (1991). *Avocado flowering basics. Agricultural and Natural Resources*. California: University of California.
- Arteaga Ramírez, R. y Romo González, J. R. (1983). *Meteorología agrícola*. México: Universidad Autónoma Chapingo.

- Ávila Dorantes, José Antonio; Chan Chi, Reymundo; Caamal Cahuich, Ignacio y Pat Fernández, Verna Grisell. (2016). Factores socioeconómicos que determinan la permanencia de los agricultores en su unidad de producción: Campeche, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(4), 743-754.
- Barsimantov, James and Navia Antezana, Jaime. (2012). Forest cover change and land tenure change in Mexico's avocado region: Is community forestry related to reduced deforestation for high value crops? *Applied Geography*, 32(2), 844-853.
- Bazaldúa Muñoz, Benjamín y García Garnica, Alejandro. (2014). Factores que limitan la capacidad de elevar la eficiencia de las organizaciones productoras de aguacate: el caso del municipio de Tetela del Volcán, Morelos. *Entreciencias*, 2(4), 183-196.
- Bravo Espinoza, M.; Sánchez Pérez, J.; Vidales Fernández, J. A.; Sáenz Reyes, J. T.; Chávez León, J. G.; Madrigal Huendo, S.; Muñoz Flores, H.; Tapia Vargas, L. M.; Orozco Gutiérrez, G.; Alcántar Rocillo, J.; Vidales Fernández, I. y Venegas González, E. (2009). *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán*. Uruapan: INIFAP.
- Buckler, Edward; Pearsall, Deborah and Holtsiord, Timothy. (1998). Climate, plant ecology and Central Mexican archaic subsistence. *Current Anthropology*(39), 152-164.
- Bunn, Christian; Länderach, Peter; Quaye, Amos; Muilerman, Sander; Noponen, Martin y Lundy, Mark. (2019). Recommendation domains to scale out climate change adaptation in cocoa production in Ghana. *Climate Services*, 16, 1-12. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405880719300640>
- Burbano Figueroa, O. (2019). West Indian avocado agroforestry systems in Montes de María (Colombia): a conceptual model of the production system. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 25(2), 75-102.
- Buttrose, M. and Alexander, D. (1978). Promotion of floral initiation in 'Fuerte' avocado by low temperature and short daylength. *Scientia Horticulturae*(8), 213-219.
- Calabrese, F. (1992). *El aguacate*. Madrid: Mundi- Prensa.
- Calvert Sanhueza, E. J. (1993). *Aproximación al ciclo fenológico del palto (Persea americana Mill), cultivar Fuerte, para la zona de Quillota, V Región*. Quillota: Universidad Católica de Valparaíso. Obtenido de http://www.avocadosource.com/papers/Chile_Papers_A-Z/A-B-C/CalvertEdmund1993.pdf
- Campos Aranda, D. F. (2005). *Agroclimatología cuantitativa de cultivos*. México: Trillas.
- Campos Campos, O. (2012). *Zonificación agroecológica del aguacate (Persea americana Mill. var. Hass) en la cuenca del Río Duero (Tesis Maestría)*. Jiquilpan, Michoacán: Instituto Politécnico Nacional.
- Carrasco J., Jorge; Abarca R., Patricio y Catalán F., Alejandra. (2018). *Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Ministerio de Agricultura de Chile*. Obtenido de

Metodología de cálculo de costos de uso de maquinaria agrícola para el cultivo de maíz: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR41410.pdf>

- Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIFEN). (2017). *Aproximación para el cálculo del riesgo*. Obtenido de www.cifen.org: http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&id=84&Itemid=111&lang=es
- Chaikiattiyos, S.; Menzel, C. and Rasmussen, T. (1994). Floral induction in tropical fruit trees: Effects of temperature and water supply. *Journal of Horticultural Science*, 69(3), 397-415.
- Charre Medellín, Juan F.; Mas, Jean F. y Chang Martínez, Laura A. (2019). Áreas potenciales actuales y futuras de los cultivos de aguacate Hass en México utilizando el modelo Maxent en escenarios de cambio climático. *Revista UD y la Geomática*(14), 26-33.
- Chávez León, G.; Tapia Vargas, L. M.; Bravo Espinoza, M.; Saenz Reyes, J. T.; Muñoz Flores, H. J.; Vidales Fernández, I.; Larios Guzmán, A.; Rentería Ánima, J. B.; Villaseñor Ramírez, F. J.; Sánchez Pérez, J. J.; Alcántar Rocillo, J. J. y Mendoza Cantú, M. (2012). *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. Uruapan: SAGARPA-INIFAP.
- Chen H.; Morrell P.L.; Ashworth V.E.T.M.; De La Cruz M. and Clegg M.T. (2009). Tracing the geographic origins of major avocado cultivars. *Journal of Heredity*(100), 56-65.
- Chivasa, Walter; Mutanga, Onesimo and Biradar, Chandrashekhar. (2019). Mapping land suitability for maize (*Zea may L.*) production using GIS and AHP technique in Zimbabwe. *South African Journal of Geomatics*, 8(2), 265-281.
- Cho, K. (2020). *Environmental impacts of the US-Mexico avocado supply chain (Master of Science)*. Michigan: University of Michigan.
- Collins, W. J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Hinton, T.; Jones, C. D.; Liddicoat, S.; Martin, G.; O'Connor, F.; Rae, J.; Senior, C.; Totterdell, I.; Woodward, S.; Reichler, T. and Kim, J. (2008). *Evaluation of the HadGEM2 model*. U.K.: Met Office. Obtenido de http://www.insc.utah.edu/~reichler/publications/papers/Collins_08_MetOffice_74.pdf
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (28 de abril de 2020). *Aguacates*. Obtenido de Biodiversidad mexicana: https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/que-nos-aportan/N_aguacate
- Coria A., V. M. (Ed.). (2009). *Tecnología para la producción de aguacate en México. Libro técnico. Núm. 8*. Uruapan, México: SAGARPA-INIFAP.
- Cossio Vargas, L. E.; Salazar García, S.; González Durán I. J. L. y Medina Torres, R. (2008). Fenología del aguacate "Hass" en el clima semicálido de Nayarit, México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 14(3), 319-324.

- Cowan, A.; Cripps, R.; Richings, E. and Taylor, N. (2001). Fruit size: Towards an understanding of the metabolic control of fruit growth using avocado as a model system. *Physiol. Plant.*(111), 127-136.
- Craparo, A. (2017). *Influence of climate change and variability on Coffea arabica in the East African highlands (PhD Thesis)*. Johannesburg: University of Witwatersrand.
- da Silva Caldana, Nathan F.; Nitsche, Pablo R.; Martelócio, Alan C.; Rudke, Anderson P.; Zaro, Geovanna C.; Batista Ferreira, Luiz G.; Contador Zaccheo, Paulo V.; Colucci de Carvalho, Sergio L. and Martins, Jorge A. (2019). Agroclimatic risk zoning of avocado (*Persea americana*) in the hidrographic basin of Paraná river III, Brazil. *Agriculture*, 9(12), 1-11.
- De la Tejera Hernández, Beatriz; Santos O., Ángel; Santamaría Q., Héctor; Gómez M., Thania y Olivares V., Carlos. (2012). El oro verde en Michoacán ¿un crecimiento sin fronteras? Acercamiento a la problemática y retos del sector aguacatero para el Estado y la sociedad. *Economía y Sociedad*, 15-40.
- Deheuvels, O. (2017). *Definición de paquetes tecnológicos agroforestales*. Recuperado el 31 de agosto de 2020, de <https://www.fontagro.org/wp-content/uploads/2019/09/PUBLICACION-REP-DOMINICANA-9-9.pdf>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2017). *Estudio de caso: introducción del cultivo de aguacate Hass y fomento de su cadena de valor en el Trifinio hondureño*. San Salvador: GIZ.
- Diamond, J. (2002). Evolution, consequences and future of plant and animal domestication. *Nature*(418), 700-707.
- Dorantes, Lidia; Parada, Lidia and Ortiz, Alicia. (2004). *AVOCADO: Post-Harvest Operation*. Rome: FAO.
- Douglas, M. and Wildavsky, A. (1983). Can We Know the Risk We Face? En M. a. Douglas, *Risk and Culture*. USA: University of California Press.
- Echánove Huacuja, F. (2008). Abriendo fronteras: el auge exportador del aguacate mexicano a Estados Unidos. *Anales de Geografía*, 28(1), 9-28.
- El Universal. (21 de junio de 2017). ¿Sabías que el aguacate deja más ganancias que el petróleo? *El Universal*. Recuperado el 2020 de agosto de 17, de <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/cartera/economia/2017/06/21/sabias-que-el-aguacate-deja-mas-ganancias-que-el-petroleo>
- Elias Castillo, Francisco y Castellvi Sentis, Francesc (coords.). (1996). *Agrometeorología*. España: Mundi Prensa.
- Esperón Rodríguez, M.; Bonifacio Bautista, M. and Barradas, V. (2015). Socio-economic vulnerability to climate change in the central mountains region of eastern Mexico. *Ambio*, 45(2), 146-160.
- Etterson, J. R. and Shaw, R. G. (2001). Constraint to adaptive evolution in response to global warming. *Science*(294), 151-154.

- Fernández Eguiarte, Agustín; Zavala Hidalgo, Jorge; Romero Centeno, Rosario; Conde Álvarez, Ana Cecilia y Trejo Vázquez, Rosa Irma. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Field, Christopher; Chapin, F. Stuart; Matson, Pamela and Mooney, Harold. (1992). Responses of terrestrial ecosystems to the changing atmosphere: a resource-based approach. *Rev. Ecol. Syst.*(23), 201-235.
- Franco Sánchez, Mario Alberto; Leos Rodríguez, Juan Antonio; Salas González, José María; Acosta Ramos, Marcelo y García Munguía, Argelia. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 391-403.
- Galán Saucó, V. (1990). *Los frutales tropicales en los subtrópicos (Aguacate-mango-Litchi-Logan)*. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Galindo Tovar, M. E.; Lee Espinosa, H. E.; Murguía González, J.; Leyva Ovalle, O. R y Landero Torres, I. (2013). Domesticación y distribución geográfica de *Persea americana* Mill. en la época precolombina. *Revista de Geografía Agrícola*(50-51), 65-70.
- Gandolfo Weiderhold, S. P. (2008). *Factores ecofisiológicos relacionados con el crecimiento vegetativo, floración y desarrollo del fruto de aguacate (Tesis Doctoral)*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Gardiazabal I., F. (2004). Factores agronómicos a considerar en la implantación de un huerto de paltos. 2° *SEMINARIO INTERNACIONAL DE PALTOS* (págs. 1-17). Chile: Sociedad Gardiazabal y Magdahl Ltda.Quillota. Obtenido de http://avocadosource.com/journals/2_seminario/2_seminario_gardiazabal_clima_suelo_y_agua_span.pdf
- Gardiazabal I., F. (2008). Palto y cítricos: generalidades del cultivo. En R. y. Ripa, *Manejo de plagas en paltos y cítricos* (págs. 15-40). Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Garibay Orozco, Claudio y Bocco Verdinelli, Gerardo. (2011). *Cambios de uso del suelo en la meseta purépecha (1976-2005)*. México: INECC-SEMARNAT.
- Gay, C.; Estrada, F.; Conde, C. y Eakin, H. (2004). Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz. En C. D. J.C. García Codron, *El clima entre el mar y la montaña* (págs. 651-660). Santander: Asociación Española de Climatología.
- Gazit, S. and Degani,C. (2002). Reproductive biology. En A. Whiley, & B. S. Wiolstenholme, *The Avocado* (págs. 101-133). UK: CABI Publishing,.
- Gerbier, N. (1980). La finalidad de la meteorología agrícola. *Boletín OMM*, 29(3), 209-215.

- Giddens, A. (2009). Climate change, risk and danger. En A. Giddens, *The politics of climate change* (págs. 17-34). Cambridge: Polity Press.
- Gómez Mendoza, L. (2017). *Clima, naturaleza y sociedad: Los retos del cambio climático en los socio-ecosistemas*. México: Bonilla Artiga Editores.
- Gómez Rojas, J. C. (1988). *Agroclimatología y espacio geográfico en el noreste del estado de Morelos (Tesis Doctorado)*. México: UNAM.
- Grageda, J. G.; Corral, J. A. R.; Romero, G. E. G.; Moreno, J. H. N.; Lagarda, J. V.; Álvarez, O. R. y Lagunes, A. J. (2016). Efecto del cambio climático en la acumulación de horas frío en la región nogalera de Hermosillo, Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias agrícolas*, 2487-2495.
- Griffies, S. M.; Winton, M.; Donner, L. J.; Horowitz, L. W.; Downes, S. M.; Farneti, R.; ... and Palter, J. B. (2011). The Dynamical Core, Physical Parameterizations, and Basic Simulation Characteristics of the Atmospheric Component AM3 of the GFDL Global Coupled Model CM3. *Journal of Climate*, 24(13), 3520-3544. Obtenido de <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2011JCLI3955.1>
- Guerrero Hoyos, Benito Gustavo; Vélez Macías, Fabio de Jesús y Morales Quintero, Diana Elizabeth. (2019). Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44), 1-20.
- Gutiérrez Contreras, Maribel; Lara Chávez, Ma. Blanca Nieves; Guillén Andrade, Héctor y Chávez Bárcenas, Ana T. (2010). Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán, México. *Interciencia*, 35(9), 647-653.
- Hernández Navarro, M. L. (1993). La agroclimatología, instrumento de planificación agrícola. *Geographicalia*(30), 213-228.
- Hernández Navarro, M. L. (1995). *El riesgo de helada en las plantaciones de frutales. El valle medio del Ebro*. Zaragoza: Institución Fernando el Católico.
- Hernández Ramírez, C.; Bonales Valencia, J. y Ortiz Paniagua, C. F. (2014). Modelos de vulnerabilidad agrícola ante los efectos del cambio climático. *CIMEXUS*, 9(2), 31-48.
- Hinkel, J. (2011). Indicators of vulnerability and adaptive capacity: towards a clarification of the science-policy interface. *Global Environmental Change*, 21(1), 198-208.
- Howden, M.; Newett, S. and Deuter, P. (2005). Climate change-risks and opportunities for the avocado industry. En P. Holland, *Proceedings of the New Zealand and Australian Avocado Grower's Conference* (págs. 1-28). Tauranga.
- Ibar, A. L. (1983). *El cultivo del aguacate, chirimoyo, mango y papaya*. México: AEDOS-IDITIA Mexicana.
- Ibarrarán Viniegra, M. E. (2014). Medición de la vulnerabilidad ante desastres hidrometeorológicos extremos . *Universidad Iberoamericana Puebla. Repositorio Institucional*, 1-33.

- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2012). *Manejo fitosanitario del cultivo del aguacate Hass*. Bogotá: ICA.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (13 de noviembre de 2016). *Vulnerabilidad al cambio climático*. Obtenido de www.gob.mx/inecc: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/vulnerabilidad-al-cambio-climatico-80125>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (18 de Mayo de 2018). *Acciones y programas*. Obtenido de Causas del cambio climático: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/causas-del-cambio-climatico>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). *Censo Agrícola, Ganadero y Forestal*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Anuario estadístico y geográfico Puebla 2017*. México: INEGI.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). (25 de mayo de 2020). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Obtenido de Puebla: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/regionalizacion.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). Summary for Policymakers. En C. Field, V. Barros, T. Stocker, Q. Dahe, D. Dokken, K. Ebi, . . . M. a. Tignor, *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (págs. 1-19). Cambridge-NY: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Glosario. En T. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, . . . Y. B. Xia, *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (págs. 185-204). Cambridge: Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo*. Ginebra: OMM-PNUMA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C. Summary for Policymakers*. Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (Marzo de 2019). *Historia del IPCC*. Obtenido de IPCC: <https://www.ipcc.ch/about/history/>
- Jamieson, D. (2014). The nature of problem. En J. Dryzek, & R. a. Norgaard, *The Oxford Handbook of Climate Change and Society*. UK: Oxford.
- Jardón Barbolla, L. O.; Alavez Gómez, V.; Méndez, A.; Gaona, A.; Wegier, A. L. y Piñero, D. (2011a). *Primer informe parcial: Análisis para la determinación de los centros de origen, domesticación y diversidad genética del género Persea y la*

- especie Persea americana (aguacate)*. México: UNAM-SEMARNAT-CONABIO.
- Jardón Barbolla, L. O.; Alavez Gómez, V.; Méndez, A.; Gaona, A.; Wegier, A. L. y Piñero, D. (2011b). *Segundo informe parcial: Análisis para la determinación de los centros de origen, domesticación y diversidad genética del género Persea y la especie Persea americana (aguacate)*. México: UNAM-SEMARNAT-CONABIO.
- Jardón Barbolla, L. O.; Alavez Gómez, V.; Méndez, A.; Gaona, A.; Wegier, A. L. y Piñero, D. (2011c). *Cuarto informe: Análisis para la determinación de los centros de origen, domesticación y diversidad genética del género Persea y la especie Persea americana (aguacate)*. México: UNAM-SEMARNAT-CONABIO.
- Kipkemboi Kogo, Benjamin; Kumar, Lalit; Koech, Richard and Kariyawasam, Champika S. (2019). Modelling climate suitability for rainfed maize Cultivation in Kenya using a Maximum Entropy (MaxENT) approach. *Agronomy*, 9(11), 727. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4395/9/11/727>
- La Jornada. (15 de febrero de 2020). El apetito voraz de aguacates. *La Jornada del campo*. Recuperado el 01 de agosto de 2020, de [https://www.jornada.com.mx/2020/02/15/delcampo/articulos/apetito-voraz.html#:~:text=Avocado%20\(Koger%2C%202018\).&text=El%20consumo%20actual%20per%20c%C3%A1pita,per%20c%C3%A1pita%20de%207%20kilogramos](https://www.jornada.com.mx/2020/02/15/delcampo/articulos/apetito-voraz.html#:~:text=Avocado%20(Koger%2C%202018).&text=El%20consumo%20actual%20per%20c%C3%A1pita,per%20c%C3%A1pita%20de%207%20kilogramos).
- Lahav, E., Stheinhardt, R. and Kalmar, D. (1992). Water requirements and the effect of salinity in an avocado orchard on clay soil. *Second world avocado congress* (págs. 323-330). Riverside: University of California.
- Länderach, P.; Martínez V., A.; Schrot, G. and Castro, N. (2011). Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries, Ghana and Cote d'Ivoire. *Climate Change*, 119(3-4), 841-854.
- Lanzelotti, Sonia L. y Buzai, Gustavo. (2017). Agricultura, ambiente y sociedad en Yocavil: análisis espacial de evaluación multicriterio con clasificaciones fuzzy. *Mundo de antes*(11), 129-147. Obtenido de https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/68119/CONICET_Digital_Nro.db040d35-3942-4dc6-a1d1-944d5b1eac7e_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Lavell, A. (2011). *Desempacando la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo. Buscando las relaciones y diferencias: una crítica y construcción conceptual y epistemológica*. México: RED-FLACSO.
- Ledesma Jimeno, M. (2000). *Climatología y meteorología agrícola*. España: Paraninfo.
- Liverman, D. (1990). *Drought Impacts in Mexico: Climate, Agriculture, Technology*. PA: Pennsylvania Pennsylvania State.
- Lomborg, B. (2001). *The Skeptical Environmentalist*. Cambridge: Cambridge University Press.

- López Fieldman, A. J. y Hernández Cortes, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico*, 83(4), 459-496.
- Lovatt, C. (2004). Eliminating alternate bearing of “Hass” Avocado. *California Avocado Research Symposium* (págs. 89-95). California: University of California.
- Lucero P., M. y Navarro A., J. A. (2013). *Requerimientos agroclimáticos del cultivo de aguacate. Desplegable para productores. Núm. 6*. La Paz, B.C.S.: SAGARPA-INIFAP.
- Magaña, V. (2012). *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante el cambio climático*. México: INECC-PNUD.
- Mendelsohn, R. and Seo, N. (2007). *Changing Farm Types and irrigation as an adaptation to climate change in Latin American agriculture*. The World Bank.
- Méndez Reyes, J. A. (2019). *El monocultivo del aguacate en Michoacán: un desarrollo paradójico para la región purépecha (Tesis Doctorado)*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Mendoza Rosas, A. Rosa; Santiago Cruz, María de Jesús y Hernández Juárez, Martín. (2018). Factores que influyen en la transferencia temporal de tierras en productores envejecidos. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(3), 339-352.
- Molua, E. and Lambi, C. (2007). *The Economic Impact of Climate Change on Agriculture in Cameroon*. Pretoria: The World Bank.
- Montagnini, Florencia; Somarriba, Eduardo; Murgueitio, Enrique; Fassola, Hugo y Eibl, Beatriz (Eds.). (2015). *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. Serie técnica. Informe técnico 402*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Cali: CIPAV.
- Monterroso Rivas, A. I.; Conde Álvarez, A. C., Gómez Díaz, J. D. y López García, J. (2007). Vulnerabilidad y riesgo en agricultura por cambio climático en la región centro del estado de Veracruz, México. *Zonas Áridas*, 11(1), 47-60.
- Monterroso Rivas, Alejandro; Conde Álvarez, Cecilia; Gay García, Carlos; Gómez Díaz, Jesus y López García, José. (2012). Indicadores de vulnerabilidad y cambio climático en la agricultura de México. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*(8), 881-890.
- Montiel Aguirre, G.; Krishnamurthy, L.; Vázquez Alarcón, A. y Uribe Gómez, M. (2008). Opciones agroforestales para productores de aguacate. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 85-90.
- Moreno Jiménez, J. M. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1-28.
- Negrete, Jaime Cuauhtémoc; Lilles Tavares Machado, Antonio y Lilles Tavares Machado, Roberto. (2013). Parque de tractores agrícolas en México: estimación

- y proyección de la demanda. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3), 61-69.
- Odeny, Dickens; Karanja, Faith; Mwachala, Geoffrey; Pellikka, Petri and Marchant, Rob. (2019). Impact of climate change on species distribution and carbon storage of agroforestry trees on isolated east African Mountains. *American Journal of Climate Change*, 364-386.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ginebra: UNISDR. Obtenido de https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Ordaz, J. L.; Ramírez, D.; Mora, J.; Acosta, A. y Serna, B. (2010). *Costa Rica. Efectos del cambio climático sobre la agricultura*. México: ONU.
- Organización de las Naciones Unidas - Organización Meteorológica Mundial (ONU-OMM). (22 de Noviembre de 2018). *Noticias ONU*. Obtenido de Los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera alcanzan un nuevo récord: <https://news.un.org/es/story/2018/11/1446191>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2017). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Aprovechar los sistemas alimentarios para lograr una transformación rural inclusiva*. Roma: FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *Manual de Estadísticas sobre Costos de Producción Agrícola. Lineamientos para la Recolección, Compilación y Difusión de Datos*. FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ca6411es/ca6411es.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *Las principales frutas tropicales. Análisis del mercado 2018*. Roma: FAO.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2019). *Manual del Marco Mundial de Gestión de Datos Climáticos de Alta Calidad*. Suiza: OMM. Obtenido de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10199
- Ortiz P., C. F. y Ortega G., A. M. (2015). Agricultura y cambio climático en la región aguacatera del estado de Michoacán. *20º Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México* (págs. 1-29). Cuernavaca: AMECIDER – CRIM, UNAM.
- Ortiz Paniagua, Carlos Francisco e Infante Jiménez, Zoe T. (2018). Competitividad del aguacate vs preservación ambiental en Michoacán: enfoque desde la economía ambiental. *Red Internacional de Investigadores en Competitividad*, 7(1), 1365-1384.
- Ortiz Paniagua, Carlos Francisco y Ortega Gómez, Alba María. (2018). Riesgo económico agrícola municipal frente al escenario A2 de cambio climático en la región aguacatera de Michoacán. *Portes, revista mexicana de estudios sobre la cuenca del Pacífico*, 12(24), 117-143.

- Ortiz Paniagua, Carlos Francisco; Zamora Torres, América Ivonne y Bonales Valencia, Joel. (2018). Vulnerabilidad económica municipal del impacto agrícola ante condiciones de cambio climático en Michoacán. *Análisis Económico*, 33(82), 73-93.
- Ouma, George; Duncan Odhiambo, George; Wagai, Samuel and Kwach, Johnson. (2019). An analysis of socioeconomic factors affecting avocado production in saline and flooded areas around Lake Victoria Basin of Western Kenya. *African Journal of Agricultural*, 14(35), 20148-2061.
- Owino, J. J., Olago, D., & Wandiga, S. O. (2020). A cluster analysis of variables essential for climate change adaptation of smallholder dairy farmers of Nandi County, Kenya. *African Journal of Agricultural Research*, 16(7), 1007-1014.
- Pacheco, Juan Francisco y Contreras, Eduardo. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago: ONU-CEPAL.
- Pascale, A. J. y Damario, E. A. (2004). *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. Buenos Aires: Facultad de Agronomía.
- Patrick, J. M. (2004). *Meltdown*. Washington: Cato Institute.
- Pearce, F. (2007). *The last generation*. London: Eden.
- Pérez Sosa, Eduardo y Granados Ramírez, Guadalupe Rebeca. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. *Tlalli. Revista de investigación en Geografía*(3), 39-67.
- Pinilla Herrera, María Carolina y Briones, Fernando. (2016). Percepciones sobre las amenazas y riesgos hidrometeorológicos entre los productores de aguacate de Tancítaro, Michoacán. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 16(31), 47-70.
- Putland, D.; Muller, J.; Deuter, P. and Newett, S. (2011). *Potential implications of climate change and climate policies for the Australian avocado industry*. Australia: Horticulture Australia.
- Queen Randela, M. (2018). *Climate change and avocado production: a case study of the Limpopo province of South Africa (Master thesis)*. South Africa: University of Pretoria.
- Ramírez Gil, J. G.; Cobos, M. E.; Jiménez García, D.; Morales Osorio, J. G. and Peterson, A. T. (2019). Current and potential future distributions of Hass avocados in the face of climate change across the Americas. *Crop and Pasture Science*, 70(8), 694-708.
- Ramírez Gil, J. G.; Morales, Juan and Townsend Peterson, A. (2018). Potential geography and productivity of “Hass” avocado crops in Colombia estimated by ecological niche modeling. *Scientia Horticulturae*, 287-295.
- Reyes Alemán, J. C.; Montiagudo Rodríguez, O. R.; Urbina Sánchez, E.; Aguilar Medel, S.; Mejía Carranza, J. y Espíndola Barquera, M. De la C. (2015). Fenología del

- aguacate Hass, una herramienta para la planificación del cultivo en el estado de México. *VII Congreso Mundial de la Palta* (págs. 371-375). Lima: Perú ProHAss.
- Rocha A., J. L.; Salazar G., S.; Bárcenas O., A. E.; González D., I. J. L. y Cossio V., L. E. (2011). Fenología del aguacate Hass en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 303-316.
- Rochette, P.; Belanger, G.; Castonguay, Y.; Bootsma, A. and Mongrain, D. (2004). Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada. *Canadian J. Plant Sci.*, 84(4), 113-1125.
- Romero Sánchez, M. A. (2012). *Comportamiento fisiológico del aguacate (Persea americana mill.) Variedad Lorena en la zona de Mariquita, Tolima. (Tesis Maestría)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Rubí Arriaga, M.; Franco Malvaíz, A. L.; Rebollar Rebollar, S.; Bobadilla Soto, E.; Martínez de la Cruz, I. y Siles Hernández, Y. (2013). Situación actual del cultivo del aguacate (*Persea americana Mill.*) en el estado de México, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(1), 93-101.
- Ruiz Corral, J. A. (2012). Adaptar la agricultura al cambio climático. *Ciencia*, 76-83. Obtenido de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/63_4/PDF/Agricultura.pdf
- Ruiz Corral, José A.; Medina García, Guillermo; González Acuña, Irma J.; Flores López, Hugo E.; Ramírez Ojeda, Gabriela; Ortiz Trejo, Ceferino; Byerly Murphy, Keir F. y Martínez Parra, Ramón A. (2013). *Requerimientos Agroecológicos de Cultivos. Libro Técnico Número 3* (Segunda ed.). Guadalajara: INIFAP. Obtenido de <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/4515>
- Sahoo, Satiprasad; Dhar, Anirban and Kar, Amlanjyoti. (2016). Environmental vulnerability assessment using Grey Analytic Hierarchy Process based model. *Environmental Impact Assessment Review*, 56, 145-154.
- Salazar G., S.; Zamora C., L. and Vega L., R. J. (2005). Update on the avocado industry of Michoacán, Mexico. *Calif. Avocado Soc. Yrbk.*, 87, 31-44.
- Salazar García, S.; Ibarra Estrada, M. E. y González Valdivia, J. (2018). Fenología del aguacate "Méndez" en el sur de Jalisco México. *Agrociencia*, 991-1003.
- Sánchez, P. J. de la L.; Alcantar R., J. J.; Coria A., V. M.; Anguiano C., J.; Vidales F., I.; Tapia V., L. M.; Aguilera M., J. L.; Hernández R., G. y Vidales F., J. A. (2001). *Tecnología para la producción de aguacate en México. Libro Técnico Número 1*. Uruapan: INIFAP.
- Sangerman Jarquín, D. M.; Larqué Saavedra, B. S.; Omaña Silvestre, J. M.; Shwenstesius de Rinderman, R. y Navarro Bravo, A. (2014). Tipología del productor de aguacate en el estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(6), 1081-1095.

- Sarmiento Sarmiento, D. (2018). El cultivo del aguacate en el sur peninsular. *Jornadas Técnicas sobre Aguacate*, (pág. 185). Canarias, España.
- Schroth, S.; Läderach, P.; Martínez V., A. I.; Bunn, C. and Jassogne, L. (2016). Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation. *Science of the Total Environment*(556), 231-241.
- Scora, R.; Wolstenholme, B. and Lavi, U. (2002). Taxonomy and Botany. En A. Whiley, & B. a. Schaffer, *The avocado, botany, production and uses* (págs. 25-45). London: CABI Publishing.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2011). *Ficha técnica. Sistema producto aguacate 2011*. Recuperado el 02 de febrero de 2020, de https://www.academia.edu/7330938/Paquete_tecnologico_de_aguacate
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2012). *Agricultura familiar con potencial productivo en México*. México: SAGARPA-FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-bc944s.pdf>
- Segundo de Jesús, E. (2018). *Índice estandarizado de precipitación (SPI) y su relación con superficie agrícola siniestrada en el estado de Zacatecas (Tesis Maestría)*. México: UNAM.
- Segundo Vivanco, Abel. (2018). *Análisis del proceso de expansión de la superficie cultivada con aguacate y su impacto en los recursos naturales del municipio de Tacámbaro, Michoacán, 1990-2016 (Tesis Maestría)*. Tijuana: El Colegio de la Frontera Norte-CICESE.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). *Atlas agroalimentario 2012-2018*. Obtenido de Aguacate: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2019). *Datos Abiertos*. Obtenido de Estadística de Producción Agrícola: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Singer, S. Fred and Avery, Dennis T. (2007). *Unstoppable Global Warming*. New York: Rowman and Littlefield.
- Smit, B. and Skinner, M. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*(7), 85-114.
- Soplas Mas, Jhovana; Rojas Briceño, Niltón B.; Meza Mori, Gerson y Sala López, Rolando. (2018). Zonificación de áreas potenciales para el desarrollo de sistemas silvopastoriles en la microcuenca Lluhca, Chachapoyas, Amazonas. *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable*, 2(3), 69-76.

- Sotelo Ruiz, Erasto Domingo; Cruz Bello, Gustavo Manuel; González Hernández, Antonio y Moreno Sánchez, Francisco. (2016). Determinación de la aptitud del terreno para maíz mediante análisis espacial multicriterio en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 401-412.
- Tapia V., L. M.; Larios, G. A.; Alcántar R., J. J. y Anguiano, C. J. (2006). Determine el programa de riego eficiente a aplicar en su huerta de aguacate. *Revista El Aguacatero*, 9(48), 7-9.
- Tapia Vargas, Luis Mario; Larios Guzmán, Antonio; Vidales Fernández, Ignacio; Pedraza Santos, Martha Elena y Barradas, Victor Luis. (2011). Cambio climático en la zona aguacatera de Michoacán: análisis de la precipitación y temperatura a largo plazo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(21), 325-335.
- Tapia, L. M.; Larios Guzmán, A. y Barradas, V. L. (2012). Respuesta fenológica del aguacate (Persea americana Mill) al gradiente climático en Michoacán. En R. y Granados Ramírez, *Centro-Occidente de México. Variación climática e impactos en la producción agrícola* (págs. 77-94). México: Instituto de Geografía.
- Thomson M., A.; Calvin V., K.; Smith J., S.; Kyle P., G.; Volke, A.; Patel, P.; Delgado A., S.; Lamberty, B.; Wise, M.; Clarke, L. and Edmonds, J. A. (2011). RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic change*, 1-25.
- Thomson, A.; Calvin K.; Chini, L.; Hurtt, G.; Edmonds, J.; Bon-Lamberty, B.; Frohking, S.; Wise, M. and Janetos, A. (2010). Climate mitigation and the future of tropical landscapes. *PNAS*, 19663-19638. Obtenido de <https://www.pnas.org/content/pnas/107/46/19633.full.pdf>
- Torres Lima, Pablo A.; Rodríguez Sánchez, Luis M.; Portes Vargas, Leodan y Ramírez González, Carolina. (2009). Cambio climático y procesos agroambientales en el desarrollo rural periurbano. En A. Guillermo Aguilar, & I. Escamilla, *Periferia urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana* (págs. 197-221). México: UNAM-Porrúa.
- Tubiello, F. N.; Rosenzweig, C.; Goldberg, R. A.; Jagtap, S. and Jones, J. W. (2002). Effects of climate change on US crop production: simulation results using two different GCM scenarios. Part I: Wheat, potato, maize, and citrus. *Climate Research*, 20, 259-270.
- Unidad Nacional de Emergencias Agrícolas y Gestión del Riesgo Agroclimático (UNEA) - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Metodología para el desarrollo cartográfico para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo agroclimático en Chile*. Santiago: UNEA-FAO.
- Urbina Vallejo, V. (2007). *Daños por heladas en frutales. Sintomatología y evaluación*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/70290173.pdf>
- Vía García, M.; Muñoz Municio, M. C. y Martín Castro, B. (2006). SIG y evaluación multicriterio en la valoración de la vegetación y flora de las áreas no protegidas de la Comunidad de Madrid. En M. T. Camacho, & J. A. Cañete (Edits.), *El acceso*

a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas, Granada (págs. 1305-1316). Granada: Universidad de Granada.

- Villanueva Tomas, Lennin y Zepeda Anaya, José Arturo. (2018). La Producción de Aguacate en el Estado de Michoacán y sus efectos en los índices de pobreza, el cambio del uso de suelo y la migración. *Revista Mexicana Sobre Desarrollo Local*(2), 1-12.
- Villers, L.; Arizpe, N.; Orellana, R.; Conde, C. y Hernández, J. (2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34(5), 322-329.
- Voldoire, A.; Sanchez-Gomez E.; Mélia, D. S.; Decharme, B.; Cassou, C.; Sénési, S.; ... and Déqué, M. (2011). The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic. *Clim Dyn*, 40(9-10), 2091-2121. Obtenido de https://www.umr-cnrm.fr/cmip5/IMG/pdf/Voldoire_et_al_CD_online.pdf
- Yalew, Seleshi; van Griensven, Ann; Mul, Marlous and van der Zaag, Pieter. (2016). Land suitability analysis for agriculture in the Abbay basin using remote sensing, GIS and AHP techniques. *Model Earth Syst. Environ.*, 1-14. Obtenido de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40808-016-0167-x.pdf>
- Zapata Guzmán, J. E.; Tobón Acevedo, J. D.; Patiño Tiria, H. I.; Palacios, E. H.; Mejía Córdoba, C. A.; Marín Zapata, H. D.; Alcaraz Machado, C. y Alcaraz Guzmán, E. (2018). *El cultivo de aguacate Persea americana en el occidente de Antioquia*. Santa Fe de Antioquia: Servicio Nacional de Aprendizaje-Centro Tecnológico, Turístico y Agroindustrial del Occidente Antioqueño.

Anexo 1. Superficies y porcentajes de aptitud por municipio

Municipio	Superficie total (ha)	Óptima	% Óptima	Apta	% Apta	Media	% Media	Poco apta	% Poco apta	No apta	% No apta
Acajete	18533.3	0.0	0%	0.0	0%	12496.9	67%	3770.7	20%	982.1	5%
Acateno	18063.8	0.0	0%	0.0	0%	11721.9	65%	3228.5	18%	2043.9	11%
Acatlán	60730.2	0.0	0%	1758.3	3%	7167.5	12%	21819.5	36%	29308.4	48%
Acatzingo	14044.9	0.0	0%	183.3	1%	13550.5	96%	310.8	2%	0.4	0%
Acteopan	7477.0	3093.1	41%	3051.8	41%	1197.4	16%	134.8	2%	0.0	0%
Ahuacatlán	9092.1	6677.1	73%	1651.7	18%	464.0	5%	299.3	3%	0.0	0%
Ahuatlán	18391.1	0.0	0%	0.0	0%	8400.5	46%	9939.0	54%	51.7	0%
Ahuazotepec	6048.2	0.5	0%	3138.3	52%	0.5	30%	1827.8	6%	0.0	0%
Ahuehuetitla	7264.7	0.0	0%	487.2	7%	197.8	3%	5049.1	70%	1530.6	21%
Ajalpan	39467.0	9270.3	23%	14472.4	37%	11134.5	28%	3696.1	9%	0.0	0%
Albino Zertuche	7943.8	0.0	0%	0.0	0%	1339.9	17%	6302.1	79%	156.1	2%
Aljojuca	5236.3	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	5168.0	99%	68.3	1%
Altepexi	4778.7	0.0	0%	0.0	0%	110.0	2%	4352.9	91%	315.7	7%
Amixtlán	4494.9	199.4	4%	2410.5	54%	942.4	21%	621.4	14%	321.2	7%
Amozoc	13507.6	0.0	0%	6014.5	45%	7004.3	52%	488.7	4%	0.0	0%
Aquixtla	16640.2	3.2	0%	724.0	4%	2427.8	15%	6686.7	40%	6798.5	41%
Atempan	4809.6	2464.7	51%	1291.6	27%	38.9	1%	345.3	7%	669.1	14%
Atexcal	33120.9	0.0	0%	24760.3	75%	7801.8	24%	444.7	1%	0.0	0%

Atlixco	29273.2	3280.4	11%	24884.8	85%	745.4	3%	362.6	1%	0.0	0%
Atoyatempan	2654.5	0.0	0%	2654.5	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Atzala	1134.6	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	1134.6	100%	0.0	0%
Atzitzihuacán	12961.0	8489.6	66%	4148.8	32%	62.1	0%	0.0	0%	0.0	0%
Atzitzintla	13309.5	0.0	0%	0.0	0%	1590.9	12%	4617.3	35%	6905.4	52%
Axutla	18799.7	0.0	0%	0.0	0%	233.1	1%	8981.8	48%	9584.8	51%
Ayotoxco de Guerrero	10701.0	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	3622.4	34%	7078.5	66%
Calpan	6682.3	0.0	0%	1108.0	17%	3587.5	54%	1955.2	29%	31.6	0%
Caltepec	39158.9	0.0	0%	33824.8	86%	3858.3	10%	663.0	2%	0.0	0%
Camocuautla	1622.6	43.6	3%	348.1	21%	575.4	35%	332.5	20%	323.1	20%
Caxhuacan	1395.9	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	116.4	8%	1279.5	92%
Coatepec	1223.1	0.0	0%	0.0	0%	198.4	16%	712.6	58%	312.0	26%
Coatzingo	11591.2	0.0	0%	0.0	0%	1637.7	14%	9953.5	86%	0.0	0%
Cohetzala	24037.4	0.0	0%	807.0	3%	1721.5	7%	10215.1	42%	11045.7	46%
Cohuecan	4727.9	617.0	13%	682.2	14%	1668.1	35%	371.7	8%	0.0	0%
Coronango	3674.8	0.0	0%	3588.6	98%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Coxcatlán	24766.7	7214.5	29%	3427.2	14%	2814.1	11%	1740.2	7%	9340.4	38%
Coyomeapan	22883.9	6891.4	30%	9558.4	42%	3669.9	16%	1657.2	7%	849.0	4%
Coyotepec	13368.3	0.0	0%	13368.3	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Cuapiaxtla de Madero	2333.4	0.0	0%	1888.2	81%	445.2	19%	0.0	0%	0.0	0%
Cuautempan	6152.2	4892.4	80%	605.2	10%	441.5	7%	213.1	3%	0.0	0%

Cuautinchán	15980.8	0.0	0%	13547.5	85%	2433.3	15%	0.0	0%	0.0	0%
Cuautlancingo	3813.3	0.0	0%	3700.7	97%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Cuayuca de Andrade	20049.3	0.0	0%	246.8	1%	3823.8	19%	14288.3	71%	1690.4	8%
Cuetzalan del Progreso	18165.3	0.0	0%	3023.4	17%	3452.9	19%	4678.0	26%	7011.1	39%
Cuyoaco	30064.9	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	13706.1	46%	16358.9	54%
Chalchicomula de Sesma	38969.2	0.0	0%	0.0	0%	1193.3	3%	19634.5	50%	18137.7	47%
Chapulco	8697.1	0.0	0%	3132.3	36%	3280.0	38%	2218.6	26%	49.1	1%
Chiautla	80352.2	0.0	0%	934.5	1%	3845.7	5%	40264.2	50%	35217.4	44%
Chiautzingo	8114.1	0.0	0%	0.0	0%	4057.6	50%	2753.5	34%	1303.0	16%
Chiconcuautila	8927.7	5433.8	61%	2658.3	30%	817.0	9%	18.5	0%	0.0	0%
Chichiquila	10894.9	7656.3	70%	2675.3	25%	74.7	1%	66.2	1%	0.0	0%
Chietla	32496.1	0.0	0%	1759.6	5%	1054.8	3%	14092.7	43%	14569.9	45%
Chigmecatitlán	2624.9	0.0	0%	0.0	0%	2443.6	93%	181.3	7%	0.0	0%
Chignahuapan	75962.2	0.0	0%	0.0	0%	3.0	0%	17901.9	24%	55376.3	73%
Chignautla	14824.0	1180.1	8%	1475.9	10%	208.6	1%	616.0	4%	11343.4	77%
Chila	12819.0	0.0	0%	8433.9	66%	3647.3	28%	0.0	0%	0.0	0%
Chila de la Sal	14072.7	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	4619.0	33%	9453.6	67%
Honey	6353.9	1849.7	29%	2008.1	32%	1461.3	23%	0.0	0%	0.0	0%
Chilchotla	14693.5	1292.9	9%	422.9	3%	2865.5	20%	6506.9	44%	3084.3	21%
Chinantla	8828.1	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	8147.4	92%	680.8	8%
Domingo Arenas	1213.1	0.0	0%	0.0	0%	1213.1	100%	0.0	0%	0.0	0%

Eloxochitlán	9968.8	1940.8	19%	1380.0	14%	1992.4	20%	746.4	7%	2786.4	28%
Epatlán	5188.8	0.0	0%	42.9	1%	3651.6	70%	1494.3	29%	0.0	0%
Esperanza	7900.6	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	1394.2	18%	6461.2	82%
Francisco Z. Mena	43041.1	0.0	0%	0.0	0%	33005.7	77%	7495.2	17%	0.0	0%
General Felipe Ángeles	9161.9	0.0	0%	0.0	0%	6685.3	73%	1237.4	14%	1239.1	14%
Guadalupe	15460.6	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	138.7	1%	15208.9	98%
Guadalupe Victoria	22435.3	0.0	0%	0.0	0%	103.6	0%	17909.4	80%	4188.6	19%
Hermenegildo Galeana	5036.2	0.0	0%	107.5	2%	80.4	2%	310.2	6%	4538.1	90%
Huaquechula	23126.3	0.0	0%	13419.0	58%	8181.5	35%	1525.7	7%	0.0	0%
Huatlatlauca	16839.8	0.0	0%	6064.1	36%	8661.2	51%	2114.5	13%	0.0	0%
Huachinango	25022.3	13831.6	55%	8641.2	35%	880.3	4%	869.4	3%	0.0	0%
Huehuetla	4792.7	0.0	0%	0.0	0%	42.9	1%	1055.8	22%	3357.5	70%
Huehuetlán el Chico	13787.6	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	2855.4	21%	10893.7	79%
Huejotzingo	17519.4	0.0	0%	1770.9	10%	11587.2	66%	2668.4	15%	1356.0	8%
Hueyapan	7451.3	1170.8	16%	3290.1	44%	1573.4	21%	1248.9	17%	168.1	2%
Hueytamalco	31962.7	0.1	0%	2407.6	8%	6144.8	19%	10600.0	33%	12438.2	39%
Hueytlalpan	4226.6	0.0	0%	125.0	3%	1345.9	32%	2211.7	52%	544.1	13%
Huitzilán de Serdán	6941.4	2694.0	39%	1196.5	17%	1816.9	26%	1234.0	18%	0.0	0%
Huitziltepec	5096.1	0.0	0%	4658.5	91%	437.7	9%	0.0	0%	0.0	0%
Atlequizayan	1250.4	0.0	0%	0.0	0%	249.7	20%	876.3	70%	124.4	10%
Ixcamilpa de Guerrero	30800.1	243.9	1%	1183.2	4%	1446.5	5%	7789.7	25%	18583.8	60%

Ixcaquixtla	10651.3	0.0	0%	10651.3	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Ixtacamaxtitlán	56759.0	0.0	0%	712.2	1%	9207.7	16%	12774.3	23%	32029.5	56%
Ixtepec	1949.3	0.0	0%	0.0	0%	430.3	22%	1141.3	59%	377.7	19%
Izúcar de Matamoros	53683.5	0.0	0%	361.1	1%	10571.1	20%	40801.2	76%	1950.1	4%
Jalpan	20590.8	0.0	0%	0.0	0%	217.1	1%	8000.6	39%	12190.4	59%
Jolalpan	59954.9	0.0	0%	0.0	0%	1324.3	2%	33388.4	56%	22852.7	38%
Jonotla	3015.6	0.0	0%	0.0	0%	48.7	2%	2123.3	70%	843.5	28%
Jopala	17070.4	0.0	0%	50.7	0%	456.8	3%	1701.8	10%	14558.8	85%
Juan C. Bonilla	2301.1	0.0	0%	2301.1	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Juan Galindo	2312.8	0.0	0%	2165.7	94%	147.1	6%	0.0	0%	0.0	0%
Juan N. Méndez	22534.9	0.0	0%	13120.6	58%	8306.9	37%	1107.5	5%	0.0	0%
Lafragua	17962.3	0.0	0%	0.0	0%	2151.6	12%	7220.7	40%	8183.9	46%
Libres	27532.9	0.0	0%	0.0	0%	9639.5	35%	9108.9	33%	8054.0	29%
La Magdalena Tlatlauquitepec	1108.9	0.0	0%	502.0	45%	606.9	55%	0.0	0%	0.0	0%
Mazapiltepec de Juárez	5459.5	0.0	0%	0.0	0%	5237.1	96%	222.5	4%	0.0	0%
Mixtla	941.9	0.0	0%	437.4	46%	504.5	54%	0.0	0%	0.0	0%
Molcaxac	15626.8	0.0	0%	14959.1	96%	667.7	4%	0.0	0%	0.0	0%
Cañada Morelos	24476.7	0.0	0%	0.0	0%	3220.6	13%	13985.0	57%	6987.3	29%
Naupan	6039.9	3384.7	56%	1611.0	27%	545.2	9%	365.4	6%	0.0	0%
Nauzontla	2772.1	758.2	27%	1809.8	65%	204.2	7%	0.0	0%	0.0	0%
Nealtican	1879.1	0.0	0%	1099.0	58%	780.1	42%	0.0	0%	0.0	0%

Nicolas Bravo	10888.7	0.0	0%	1142.6	10%	1374.3	13%	2254.2	21%	5752.6	53%
Nopalucan	16827.3	0.0	0%	0.0	0%	14371.2	85%	1248.4	7%	91.5	1%
Ocoatepec	6710.0	0.0	0%	0.0	0%	32.6	0%	2449.2	37%	4228.2	63%
Ocoyucan	11955.4	0.0	0%	11955.4	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Olintla	6302.0	0.0	0%	0.0	0%	282.3	4%	1570.2	25%	4241.0	67%
Oriental	23955.7	0.0	0%	0.0	0%	15894.7	66%	4002.3	17%	718.8	3%
Pahuatlán	9905.7	4108.5	41%	3403.8	34%	984.4	10%	366.8	4%	0.0	0%
Palmar de Bravo	36237.6	0.0	0%	0.0	0%	17170.6	47%	15863.9	44%	3203.1	9%
Pantepec	22212.4	0.0	0%	0.0	0%	7155.9	32%	12305.9	55%	1487.9	7%
Petlalcingo	23338.8	0.0	0%	177.6	1%	3203.9	14%	18038.1	77%	1576.5	7%
Pixtla	22108.7	0.0	0%	0.0	0%	29.2	0%	10365.6	47%	11713.9	53%
Puebla	54420.1	0.0	0%	42803.1	79%	4406.6	8%	3050.6	6%	1328.6	2%
Quecholac	18722.6	0.0	0%	423.4	2%	12769.8	68%	1881.9	10%	3647.6	19%
Quimixtlán	16589.9	6121.0	37%	4803.5	29%	2656.7	16%	1909.9	12%	21.1	0%
Rafael Lara Grajales	409.6	0.0	0%	0.0	0%	409.6	100%	0.0	0%	0.0	0%
Los Reyes de Juárez	3052.5	750.3	25%	0.0	0%	2302.2	75%	0.0	0%	0.0	0%
San Andres Cholula	5865.7	0.0	0%	5865.7	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
San Antonio Cañada	7987.7	0.0	0%	4078.6	51%	1278.6	16%	2630.5	33%	0.0	0%
San Diego la Mesa Tochimiltzingo	13304.1	0.0	0%	9914.7	75%	3389.4	25%	0.0	0%	0.0	0%
San Felipe Teotlalcingo	3934.1	0.0	0%	0.0	0%	2311.5	59%	1193.8	30%	428.8	11%
San Felipe Tepatlán	4506.5	0.0	0%	29.3	1%	850.6	19%	1212.8	27%	2413.9	54%

San Gabriel Chilac	10898.9	0.0	0%	3143.5	29%	2393.2	22%	4425.5	41%	936.7	9%
San Gregorio Atzompa	1175.5	0.0	0%	1175.5	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
San Jerónimo Tecuanipan	3968.7	0.0	0%	3968.7	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
San Jerónimo Xayacatlán	14247.8	0.0	0%	252.2	2%	2346.9	16%	9339.0	66%	2133.9	15%
San José Chiapa	17687.7	0.0	0%	0.0	0%	16176.9	91%	0.0	0%	0.0	0%
San José Miahuatlán	33328.1	0.0	0%	6037.2	18%	3247.6	10%	3985.2	12%	19697.7	59%
San Juan Atenco	9631.5	0.0	0%	0.0	0%	5.9	0%	8684.5	90%	941.0	10%
San Juan Atzompa	2473.9	0.0	0%	2408.1	97%	65.8	3%	0.0	0%	0.0	0%
San Martín Texmelucan	8294.9	0.0	0%	0.0	0%	8070.1	97%	17.0	0%	0.0	0%
San Martín Totoltepec	726.5	0.0	0%	0.0	0%	726.5	100%	0.0	0%	0.0	0%
San Matías Tlalancaleca	5145.4	0.0	0%	0.0	0%	2915.5	57%	2087.8	41%	0.0	0%
San Miguel Ixítlán	7256.9	0.0	0%	5537.7	76%	302.1	4%	0.0	0%	0.0	0%
San Miguel Xoxtla	644.9	0.0	0%	522.9	81%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
San Nicolás Buenos Aires	21009.3	0.0	0%	0.0	0%	2760.2	13%	15993.4	76%	2255.8	11%
San Nicolás de los Ranchos	16229.7	0.0	0%	0.0	0%	2830.8	17%	6800.9	42%	5988.7	37%
San Pablo Anicano	9731.0	0.0	0%	0.0	0%	26.5	0%	3220.4	33%	6484.1	67%
San Pedro Cholula	7625.6	0.0	0%	7625.6	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
San Pedro Yeloixtlahuaca	17484.8	0.0	0%	52.1	0%	1531.0	9%	7344.5	42%	8383.2	48%
San Salvador el Seco	22018.8	0.0	0%	0.0	0%	14305.2	65%	6875.5	31%	823.1	4%
San Salvador el Verde	10860.9	0.0	0%	0.0	0%	4138.6	38%	1930.1	18%	4267.2	39%
San Salvador Huixcolotla	2384.1	0.0	0%	2384.1	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%

San Sebastián Tlacotepec	23636.1	0.0	0%	2514.2	11%	2940.6	12%	1649.4	7%	15295.3	65%
Santa Catarina Tlaltempan	4740.5	0.0	0%	0.0	0%	3580.0	76%	1160.5	24%	0.0	0%
Santa Inés Ahuatempan	28343.6	0.0	0%	20745.2	73%	6519.9	23%	1070.7	4%	7.8	0%
Santa Isabel Cholula	3265.1	0.0	0%	3265.1	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Santiago Miahuatlán	9366.5	0.0	0%	7538.1	80%	539.8	6%	987.4	11%	301.2	3%
Huehuetlán el Grande	18051.5	8123.4	0%	0.0	45%	8269.5	46%	1658.6	9%	0.0	0%
Santo Tomas Hueyotlipan	1944.8	0.0	0%	1944.8	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Soltepec	11512.8	0.0	0%	0.0	0%	9035.5	78%	1587.7	14%	889.6	8%
Tecali de Herrera	17591.6	0.0	0%	16728.6	95%	863.0	5%	0.0	0%	0.0	0%
Tecamachalco	18011.5	0.0	0%	13168.0	73%	3933.5	22%	436.5	2%	473.5	3%
Tecomatlán	14554.1	0.0	0%	0.0	0%	12.8	0%	3630.1	25%	10864.2	75%
Tehuacán	55348.0	0.0	0%	33526.8	61%	13709.9	25%	5687.8	10%	2423.5	4%
Tehuiztingo	49172.5	0.0	0%	0.0	0%	2455.1	5%	23145.4	47%	23572.0	48%
Tenampulco	14018.1	0.0	0%	0.0	0%	7581.6	54%	5207.5	37%	0.0	0%
Teopantlán	24841.2	0.0	0%	11129.4	45%	12300.5	50%	1411.3	6%	0.0	0%
Teotlalco	13623.6	0.0	0%	568.0	4%	1195.2	9%	8777.2	64%	1777.5	13%
Tepanco de López	22455.1	0.0	0%	18484.1	82%	2715.5	12%	1130.4	5%	125.0	1%
Tepango de Rodríguez	2865.4	1453.3	51%	842.0	29%	225.8	8%	344.3	12%	0.0	0%
Tepatlxco de Hidalgo	6933.9	0.0	0%	0.0	0%	1747.0	25%	1918.2	28%	2199.1	32%
Tepeaca	21731.2	0.0	0%	702.4	3%	20196.5	93%	832.3	4%	0.0	0%
Tepemaxalco	2972.8	1046.4	35%	1371.3	46%	555.2	19%	0.0	0%	0.0	0%

Tepeojuma	13213.1	0.0	0%	1816.8	14%	11396.3	86%	0.0	0%	0.0	0%
Tepetzintla	7083.2	5466.3	77%	1112.7	16%	504.2	7%	0.0	0%	0.0	0%
Tepexco	11630.5	0.0	0%	58.8	1%	1134.4	10%	9986.5	86%	109.4	1%
Tepexi de Rodríguez	39202.9	0.0	0%	32888.4	84%	5796.9	15%	517.6	1%	0.0	0%
Tepeyahualco	45028.7	0.0	0%	0.0	0%	2666.9	6%	27379.7	61%	14228.5	32%
Tepeyahualco de Cuauhtémoc	1534.3	0.0	0%	1534.3	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Tetela de Ocampo	32859.7	10709.4	33%	6997.4	21%	5015.5	15%	4104.4	12%	6033.1	18%
Teteles de Ávila Castillo	982.5	982.5	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Teziutlán	9261.3	3612.4	39%	4130.2	45%	958.6	10%	525.6	6%	34.4	0%
Tianguismanalco	13309.1	0.0	0%	9361.2	70%	2924.7	22%	959.5	7%	63.8	0%
Tilapa	8380.9	0.0	0%	0.0	0%	1379.5	16%	7001.4	84%	0.0	0%
Tlacotepec de Benito Juárez	39836.3	0.0	0%	26408.1	66%	7424.7	19%	2797.5	7%	3205.9	8%
Tlacuilotepec	17370.5	101.3	1%	4657.8	27%	935.9	5%	8140.0	47%	3152.3	18%
Tlachichuca	42205.2	0.0	0%	0.0	0%	5923.2	14%	23602.4	56%	12520.8	30%
Tlahuapan	31167.2	0.0	0%	0.0	0%	1363.2	4%	9473.2	30%	18520.3	59%
Tlaltenango	2086.3	0.0	0%	1948.6	93%	112.1	5%	0.0	0%	0.0	0%
Tlanepantla	1486.8	0.0	0%	1486.8	100%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%
Tlaola	14304.6	111.8	1%	8965.9	63%	2416.4	17%	2263.0	16%	506.5	4%
Tlapacoya	6322.2	0.0	0%	2110.0	33%	1714.1	27%	1031.7	16%	1466.4	23%
Tlapanalá	8371.0	0.0	0%	0.0	0%	7735.9	92%	635.1	8%	0.0	0%
Tlatlauquitepec	29402.9	7762.5	26%	5982.3	20%	3753.2	13%	2993.8	10%	8830.6	30%

Tlaxco	5458.8	0.0	0%	1530.9	28%	1687.3	31%	1445.8	26%	57.3	1%
Tochimilco	21872.9	6752.8	31%	4955.0	23%	2840.7	13%	3939.3	18%	1863.8	9%
Tochtepec	10203.3	0.0	0%	9646.9	95%	556.4	5%	0.0	0%	0.0	0%
Totoltepec de Guerrero	14805.4	0.0	0%	6917.3	47%	4502.0	30%	3282.1	22%	40.8	0%
Tulcingo	27735.2	0.0	0%	565.8	2%	4897.6	18%	19174.9	69%	2098.9	8%
Tuzamapan de Galeana	4191.2	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	932.5	22%	2348.2	56%
Tzicatlacoyan	27890.2	0.0	0%	25653.2	92%	2191.8	8%	0.0	0%	0.0	0%
Venustiano Carranza	31638.6	0.0	0%	0.0	0%	8750.2	28%	7332.7	23%	14058.5	44%
Vicente Guerrero	24433.6	789.6	3%	3206.0	13%	7790.2	32%	9760.2	40%	2208.6	9%
Xayacatlán de Bravo	5986.6	0.0	0%	745.4	12%	2107.2	35%	2071.4	35%	1062.5	18%
Xicotepec	31208.7	0.0	0%	8169.8	26%	2650.6	8%	4446.5	14%	15813.5	51%
Xicotlan	20502.0	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	5744.2	28%	14757.8	72%
Xiutetelco	14540.7	1466.5	10%	1030.5	7%	507.5	3%	466.1	3%	10660.8	73%
Xochiapulco	5969.5	4693.4	79%	1245.1	21%	2.6	0%	28.4	0%	0.0	0%
Xochiltepec	4657.0	0.0	0%	79.1	2%	4577.4	98%	0.4	0%	0.0	0%
Xochitlán de Vicente Suarez	7815.5	3123.9	40%	1849.9	24%	1203.8	15%	1518.6	19%	119.3	2%
Xochitlán Todos Santos	16362.5	0.0	0%	14921.8	91%	1440.7	9%	0.0	0%	0.0	0%
Yaonahuac	2981.0	776.9	26%	882.6	30%	867.5	29%	453.9	15%	0.0	0%
Yehualtepec	12570.4	0.0	0%	9179.4	73%	2998.3	24%	392.8	3%	0.0	0%
Zacapala	24820.4	0.0	0%	6650.6	27%	11449.8	46%	6720.0	27%	0.0	0%
Zacapoaxtla	17655.7	8940.4	51%	6068.8	34%	735.3	4%	1287.0	7%	624.3	4%

Zacatlán	48896.4	12012.3	25%	6588.2	13%	6394.3	13%	17543.0	36%	6030.4	12%
Zapotitlán	42757.4	0.0	0%	31538.0	74%	10613.6	25%	55.6	0%	0.0	0%
Zapotitlán de Méndez	2028.6	0.0	0%	163.8	8%	762.8	38%	782.8	39%	319.2	16%
Zaragoza	3088.7	0.0	0%	138.7	4%	1159.5	38%	1212.6	39%	577.9	19%
Zautla	26656.0	921.4	3%	7934.4	30%	4828.0	18%	5798.3	22%	7174.0	27%
Zihuateutla	17641.9	0.0	0%	443.5	3%	206.7	1%	4029.2	23%	12009.5	68%
Zinacatepec	6293.2	0.0	0%	159.0	3%	310.7	5%	3437.0	55%	2386.5	38%
Zongozotla	3671.2	2101.0	57%	529.3	14%	875.6	24%	162.9	4%	2.5	0%
Zoquiapan	3359.5	0.0	0%	0.0	0%	633.9	34%	757.4	40%	999.5	26%
Zoquitlán	26890.0	7372.0	27%	8488.8	32%	5425.4	20%	924.6	3%	4679.3	17%

Anexo 2. Superficies potenciales sostenibles por municipio

Municipio	Potencial óptimo	Potencial apto	Potencial medio
Acajete	0.0	0.0	11741.0
Acateno	0.0	0.0	11721.9
Acatlán	0.0	1322.9	5964.9
Acatzingo	0.0	183.3	12878.9
Acteopan	3026.0	2343.8	1141.9
Ahuacatlán	2734.1	1078.5	301.6
Ahuatlán	0.0	0.0	6054.1
Ahuazotepec	0.5	1285.8	1282.8
Ahuehuetitla	0.0	0.0	43.2
Ajalpan	5261.6	8190.6	6763.0
Albino Zertuche	0.0	0.0	899.8
Aljojuca	0.0	0.0	0.0
Altepexi	0.0	0.0	110.0
Amixtlán	199.4	1849.6	772.7
Amozoc	0.0	5706.5	6847.5
Aquixtla	3.2	324.1	1848.9
Atempan	2202.0	857.3	38.9
Atexcal	0.0	18647.8	2948.8
Atlixco	3280.4	24802.9	730.9
Atoyatempan	0.0	2654.5	0.0
Atzala	0.0	0.0	0.0
Atzitzihuacán	8489.6	4023.9	62.1
Atzitzintla	0.0	0.0	541.5
Axutla	0.0	0.0	0.0
Ayotoxco de Guerrero	0.0	0.0	0.0
Calpan	0.0	1108.0	3534.5
Caltepec	0.0	6082.1	1853.9
Camocuautla	0.0	226.7	185.1
Caxhuacan	0.0	0.0	0.0
Coatepec	0.0	0.0	190.2
Coatzingo	0.0	0.0	824.1
Cohetzala	0.0	563.2	958.0
Cohuecan	617.0	682.2	1668.1
Coronango	0.0	3588.6	0.0
Coxcatlán	1849.9	1534.0	635.5
Coyomeapan	5497.0	4164.3	966.3
Coyotepec	0.0	12724.9	0.0
Cuapiaxtla de Madero	0.0	1888.2	445.2
Cuautempan	2560.2	98.2	155.5
Cuautinchán	0.0	13528.9	2405.7
Cuautlancingo	0.0	3700.7	0.0
Cuayuca de Andrade	0.0	246.8	3537.7
Cuetzalan del Progreso	0.0	1756.8	2339.9

Cuyoaco	0.0	0.0	0.0
Chalchicomula de Sesma	0.0	0.0	105.8
Chapulco	0.0	2312.3	1932.0
Chiautla	0.0	718.7	2502.0
Chiautzingo	0.0	0.0	4057.6
Chiconcuautla	2571.8	2431.1	391.8
Chichiquila	4659.5	1759.0	0.0
Chietla	0.0	1157.4	341.8
Chigmecatitlán	0.0	0.0	2443.6
Chignahuapan	0.0	0.0	3.0
Chignautla	643.7	1113.2	208.6
Chila	0.0	8433.9	3647.3
Chila de la Sal	0.0	0.0	0.0
Honey	1194.3	2008.1	1351.4
Chilchotla	697.8	252.8	1004.6
Chinantla	0.0	0.0	0.0
Domingo Arenas	0.0	0.0	1119.6
Eloxochitlán	1605.8	1380.0	1930.4
Epatlán	0.0	0.0	2333.7
Esperanza	0.0	0.0	0.0
Francisco Z. Mena	0.0	0.0	32731.2
General Felipe Ángeles	0.0	0.0	6685.3
Guadalupe	0.0	0.0	0.0
Guadalupe Victoria	0.0	0.0	57.8
Hermenegildo Galeana	0.0	25.4	80.4
Huaquechula	0.0	13155.9	8166.7
Huatlatlauca	0.0	6064.1	8661.2
Huachinango	1622.5	2952.8	48.4
Huehuetla	0.0	0.0	42.9
Huehuetlán el Chico	0.0	0.0	0.0
Huejotzingo	0.0	1770.9	11459.0
Hueyapan	1010.0	3290.1	302.2
Hueytamalco	0.0	572.4	5897.9
Hueytlalpan	0.0	125.0	1331.4
Huitzilan de Serdán	785.2	959.0	1582.1
Huitziltepec	0.0	4658.5	437.7
Atlequizayan	0.0	0.0	249.7
Ixcamilpa de Guerrero	243.9	1106.0	793.4
Ixcaquixtla	0.0	10651.3	0.0
Ixtacamaxtitlán	0.0	712.2	8301.2
Ixtepec	0.0	0.0	430.3
Izúcar de Matamoros	0.0	356.1	4303.0
Jalpan	0.0	0.0	217.1
Jolalpan	0.0	0.0	1295.0
Jonotla	0.0	0.0	48.7
Jopala	0.0	50.7	456.8

Juan C. Bonilla	0.0	2301.1	0.0
Juan Galindo	0.0	700.6	0.0
Juan N. Méndez	0.0	13120.6	8306.9
Lafragua	0.0	0.0	1009.4
Libres	0.0	0.0	9558.8
La Magdalena Tlatlauquitepec	0.0	392.7	606.9
Mazapiltepec de Juárez	0.0	0.0	5027.8
Mixtla	0.0	437.4	504.5
Molcaxac	0.0	13601.7	667.7
Cañada Morelos	0.0	0.0	2656.6
Naupan	2183.8	1299.0	467.3
Nauzontla	758.2	1747.9	204.2
Nealtican	0.0	1099.0	763.1
Nicolas Bravo	0.0	1142.6	1374.3
Nopalucan	0.0	0.0	14036.2
Ocotepc	0.0	0.0	32.6
Ocoyucan	0.0	11635.8	0.0
Olintla	0.0	0.0	282.3
Oriental	0.0	0.0	15843.0
Pahuatlán	2813.1	3067.1	984.4
Palmar de Bravo	0.0	0.0	16577.6
Pantepec	0.0	0.0	7155.9
Petlalcingo	0.0	177.6	2753.3
Piaxtla	0.0	0.0	0.0
Puebla	0.0	42252.2	4406.6
Quecholac	0.0	423.4	12769.8
Quimixtlán	4508.3	3389.4	1367.3
Rafael Lara Grajales	0.0	0.0	409.6
Los Reyes de Juárez	750.3	0.0	2302.2
San Andres Cholula	0.0	5865.7	0.0
San Antonio Cañada	0.0	3033.4	1159.4
San Diego la Mesa Tochimiltzingo	0.0	8367.1	3334.0
San Felipe Teotlalcingo	0.0	0.0	2311.5
San Felipe Tepatlán	0.0	29.3	581.1
San Gabriel Chilac	0.0	68.2	0.0
San Gregorio Atzompa	0.0	1175.5	0.0
San Jerónimo Tecuanipan	0.0	3968.7	0.0
San Jerónimo Xayacatlán	0.0	224.8	2052.2
San José Chiapa	0.0	0.0	16176.9
San José Miahuatlán	0.0	129.5	4.6
San Juan Atenco	0.0	0.0	5.9
San Juan Atzompa	0.0	2408.1	65.8
San Martin Texmelucan	0.0	0.0	8070.1
San Martin Totoltepec	0.0	0.0	726.5
San Matías Tlalancaleca	0.0	0.0	2915.5

San Miguel Ixitlán	0.0	4057.0	302.1
San Miguel Xoxtla	0.0	522.9	0.0
San Nicolas Buenos Aires	0.0	0.0	2760.2
San Nicolas de los Ranchos	0.0	0.0	1620.5
San Pablo Anicano	0.0	0.0	0.0
San Pedro Cholula	0.0	7625.6	0.0
San Pedro Yeloixtlahuaca	0.0	52.1	1024.1
San Salvador el Seco	0.0	0.0	14305.2
San Salvador el Verde	0.0	0.0	4138.6
San Salvador Huixcolotla	0.0	2384.1	0.0
San Sebastián Tlacotepec	0.0	856.4	1433.1
Santa Catarina Tlaltempan	0.0	0.0	3580.0
Santa Inés Ahuatempan	0.0	19045.2	5446.9
Santa Isabel Cholula	0.0	3265.1	0.0
Santiago Miahuatlán	0.0	4733.1	539.8
Huehuetlán el Grande	0.0	6615.9	7277.3
Santo Tomas Hueyotlipan	0.0	1944.8	0.0
Soltepec	0.0	0.0	8276.0
Tecali de Herrera	0.0	16720.8	863.0
Tecamachalco	0.0	13168.0	3082.5
Tecomatlán	0.0	0.0	12.8
Tehuacán	0.0	17110.9	7081.6
Tehuizingo	0.0	0.0	741.1
Tenampulco	0.0	0.0	7363.2
Teopantlán	0.0	10582.0	8166.9
Teotlalco	0.0	529.0	1000.2
Tepanco de López	0.0	13336.1	2113.5
Tepango de Rodríguez	501.1	197.4	0.0
Tepatlxco de Hidalgo	0.0	0.0	1643.0
Tepeaca	0.0	702.4	19949.9
Tepemaxalco	967.5	1353.6	555.2
Tepeojuma	0.0	1789.5	10113.1
Tepetzintla	2080.5	235.3	113.6
Tepexco	0.0	58.8	836.3
Tepexi de Rodríguez	0.0	31613.4	5093.9
Tepeyahualco	0.0	0.0	2615.2
Tepeyahualco de Cuauhtémoc	0.0	1534.3	0.0
Tetela de Ocampo	4512.1	1640.9	674.7
Teteles de Ávila Castillo	930.2	0.0	0.0
Teziutlán	3243.9	1527.3	746.9
Tianguismanalco	0.0	9251.5	1830.3
Tilapa	0.0	0.0	1071.0
Tlacotepec de Benito Juárez	0.0	26408.1	6412.7
Tlacuilotepec	101.3	3371.5	679.7
Tlachichuca	0.0	0.0	2108.3
Tlahuapan	0.0	0.0	1363.2

Tlaltenango	0.0	1948.6	112.1
Tlanepantla	0.0	1486.8	0.0
Tlaola	0.0	5083.3	1839.0
Tlapacoya	0.0	1040.2	1411.9
Tlapanalá	0.0	0.0	7091.6
Tlatlauquitepec	5502.6	4143.8	1721.1
Tlaxco	0.0	1403.5	1596.3
Tochimilco	6752.8	4689.7	1344.5
Tochtepec	0.0	9646.9	556.4
Totoltepec de Guerrero	0.0	3271.2	2214.9
Tulcingo	0.0	0.0	2126.0
Tuzamapan de Galeana	0.0	0.0	0.0
Tzicatlacoyan	0.0	22134.8	1574.5
Venustiano Carranza	0.0	0.0	8520.3
Vicente Guerrero	789.6	3036.7	6511.8
Xayacatlán de Bravo	0.0	0.0	1057.8
Xicotepec	0.0	6753.5	1816.1
Xicotlan	0.0	0.0	0.0
Xiutetelco	1466.5	871.9	507.5
Xochiapulco	672.8	471.8	0.0
Xochiltepec	0.0	79.1	4069.5
Xochitlán de Vicente Suarez	1327.8	1720.3	1203.8
Xochitlán Todos Santos	0.0	14921.8	1440.7
Yaonahuac	774.0	261.3	9.3
Yehualtepec	0.0	9179.4	1394.3
Zacapala	0.0	5246.9	10413.9
Zacapoaxtla	6718.8	4102.7	480.8
Zacatlán	5436.1	4924.0	4192.4
Zapotitlán	0.0	4114.2	1361.3
Zapotitlán de Méndez	0.0	148.0	608.3
Zaragoza	0.0	111.9	1023.0
Zautla	619.0	6777.1	2437.3
Zihuateutla	0.0	6.5	0.0
Zinacatepec	0.0	27.3	0.0
Zongozotla	104.2	0.0	57.9
Zoquiapan	0.0	0.0	582.4
Zoquitlán	4815.3	5854.8	2933.0

Anexo 3. Probabilidad de heladas tardías en Puebla

Clave	1D ¹⁶ FEB	2D FEB	3D FEB	1D MAR	2D MAR	3D MAR	1D ABR	2D ABR	3D ABR	1D MAY	2D MAY	3D MAY
21007	7.4	0.0	3.7	3.7	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21008	4.8	9.5	4.8	9.5	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21009	40.0	31.1	28.9	26.7	22.2	13.3	17.8	17.8	8.9	4.4	0.0	0.0
21016	22.2	7.4	3.7	14.8	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21019	8.7	0.0	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21021	25.0	17.9	17.9	14.3	14.3	17.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21034	33.3	23.8	33.3	19.0	9.5	4.8	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0
21035	6.9	0.0	6.9	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21040	92.6	92.6	63.0	66.7	44.4	48.1	11.1	14.8	11.1	7.4	0.0	11.1
21043	9.6	5.8	1.9	1.9	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21047	53.8	57.7	61.5	42.3	34.6	26.9	11.5	0.0	3.8	0.0	3.8	3.8
21049	2.6	2.6	2.6	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21052	81.5	74.1	66.7	66.7	55.6	29.6	29.6	7.4	14.8	0.0	0.0	3.7
21059	63.0	37.0	48.1	48.1	33.3	18.5	11.1	7.4	3.7	3.7	7.4	3.7
21060	68.2	50.0	68.2	59.1	50.0	45.5	31.8	27.3	9.1	13.6	13.6	9.1
21074	8.7	8.7	4.3	17.4	13.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21077	79.2	75.0	54.2	58.3	20.8	29.2	8.3	16.7	4.2	4.2	0.0	0.0
21080	65.4	65.4	57.7	57.7	50.0	50.0	38.5	34.6	26.9	23.1	19.2	19.2
21081	93.1	82.8	79.3	79.3	69.0	51.7	44.8	24.1	17.2	10.3	10.3	20.7
21082	45.5	54.5	40.9	36.4	18.2	13.6	13.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21083	8.7	13.0	4.3	4.3	4.3	0.0	0.0	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0
21087	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21091	12.0	0.0	4.0	8.0	4.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

¹⁶ La letra "D" se refiere al término decena.

21096	28.0	12.0	12.0	8.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21098	13.9	8.3	2.8	11.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21102	16.0	16.0	0.0	8.0	0.0	4.0	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21104	26.1	17.4	17.4	17.4	0.0	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21107	24.4	26.7	20.0	22.2	13.3	8.9	8.9	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0
21111	29.2	29.2	10.4	14.6	8.3	6.3	2.1	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0
21114	3.7	0.0	3.7	7.4	3.7	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21117	58.3	75.0	50.0	54.2	29.2	33.3	4.2	12.5	0.0	0.0	4.2	0.0
21118	7.7	3.8	3.8	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21119	48.1	44.4	29.6	29.6	18.5	18.5	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0
21127	3.7	0.0	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21129	88.5	80.8	53.8	73.1	57.7	38.5	15.4	19.2	3.8	7.7	7.7	15.4
21167	33.3	8.3	16.7	5.0	0.0	8.3	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0
21203	13.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Anexo 4. Número y frecuencia de heladas tardías en Puebla

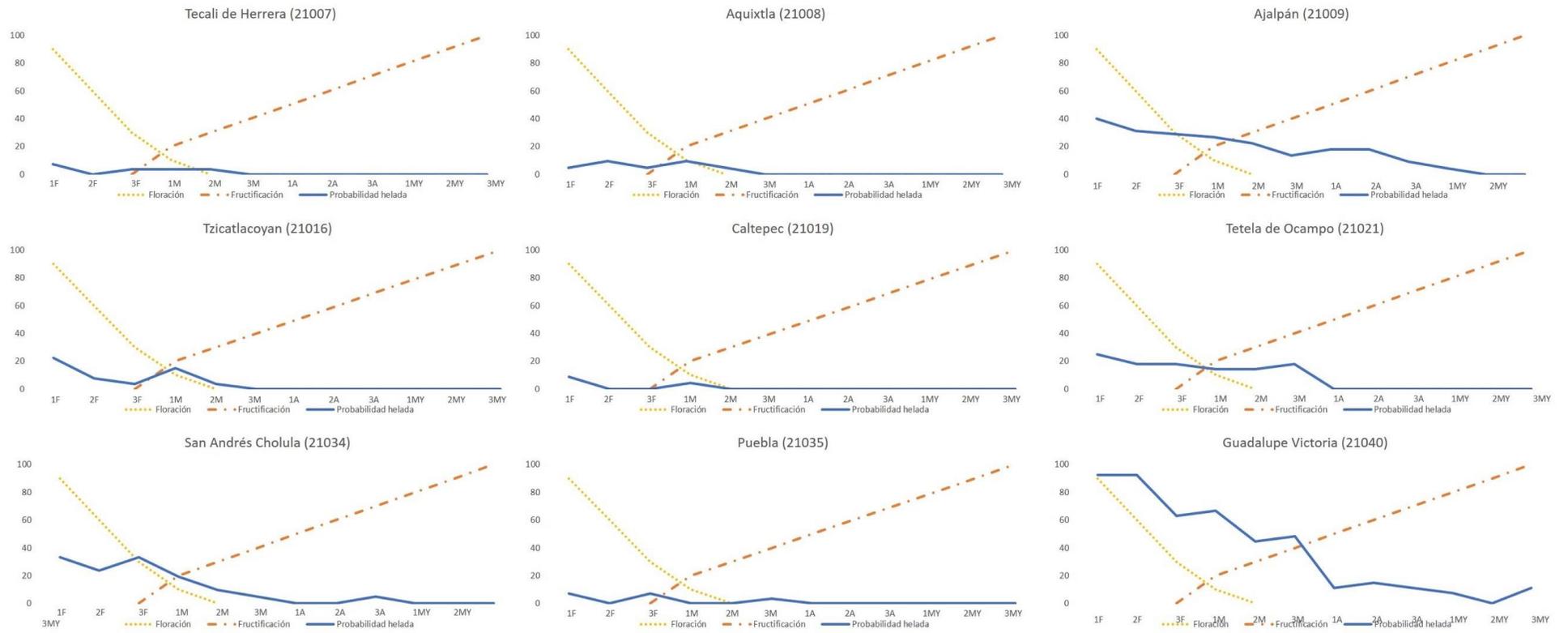
Clave	Categoría	1D FEB	2D FEB	3D FEB	1D MAR	2D MAR	3D MAR	1D ABR	2D ABR	3D ABR	1D MAY	2D MAY	3D MAY
21007	N° de heladas	5.0	0.0	1.0	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	1.9	0.0	0.5	1.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21008	N° de heladas	2.0	3.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	1.0	1.4	1.2	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21009	N° de heladas	43.0	40.0	36.0	31.0	25.0	12.0	17.0	14.0	4.0	3.0	0.0	0.0
	Frecuencia	9.6	8.9	10.0	6.9	5.6	2.7	3.8	3.8	0.9	0.7	0.0	0.0
21016	N° de heladas	12.0	3.0	4.0	6.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	4.4	1.1	1.9	2.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21019	N° de heladas	3.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	1.3	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21021	N° de heladas	13.0	6.0	8.0	7.0	5.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	4.6	2.1	3.6	2.5	1.8	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21034	N° de heladas	21.0	13.0	16.0	7.0	7.0	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	10.0	6.2	9.5	3.3	3.3	0.9	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
21035	N° de heladas	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	0.7	0.0	0.9	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21040	N° de heladas	90.0	82.0	42.0	53.0	27.0	34.0	3.0	9.0	7.0	2.0	0.0	4.0
	Frecuencia	33.3	30.4	19.4	19.6	10.0	11.4	1.1	3.3	2.6	0.7	0.0	1.3

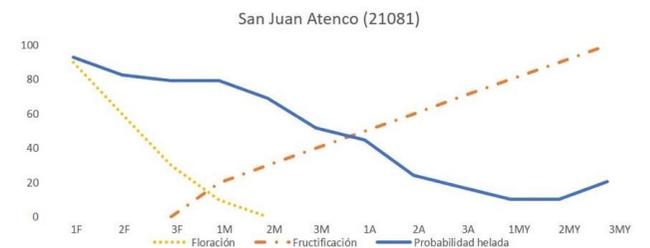
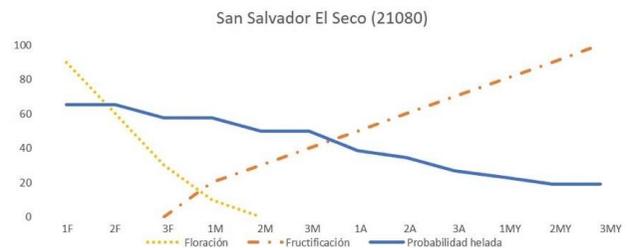
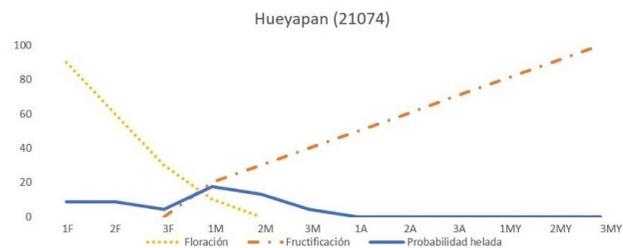
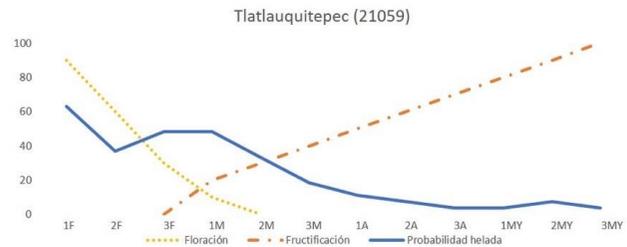
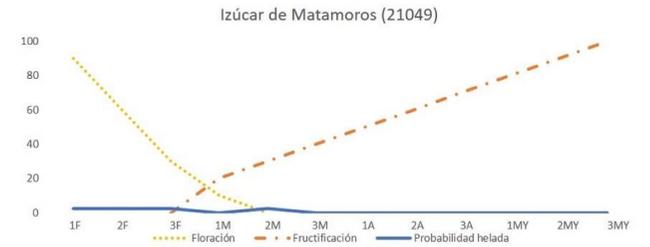
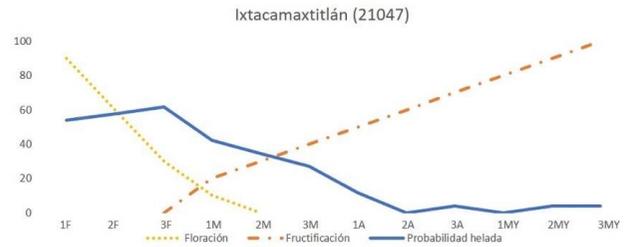
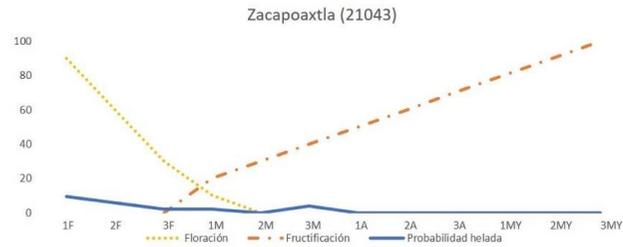
21043	N° de heladas	7.0	5.0	1.0	2.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	1.3	1.0	0.2	0.4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21047	N° de heladas	43.0	33.0	37.0	34.0	18.0	9.0	4.0	0.0	6.0	0.0	1.0	1.0
	Frecuencia	16.5	12.7	17.8	13.1	6.9	3.1	1.5	0.0	2.3	0.0	0.4	0.3
21049	N° de heladas	1.0	3.0	3.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	0.3	0.8	1.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21052	N° de heladas	90.0	79.0	57.0	57.0	31.0	28.0	10.0	3.0	11.0	0.0	0.0	1.0
	Frecuencia	33.3	29.3	26.4	21.1	11.5	9.4	3.7	1.1	4.1	0.0	0.0	0.3
21059	N° de heladas	60.0	28.0	29.0	35.0	19.0	16.0	5.0	8.0	3.0	1.0	2.0	2.0
	Frecuencia	22.2	10.4	13.4	13.0	7.0	5.4	1.9	3.0	1.1	0.4	0.7	0.7
21060	N° de heladas	35.0	42.0	47.0	39.0	32.0	21.0	8.0	10.0	8.0	5.0	4.0	5.0
	Frecuencia	15.9	19.1	26.7	17.7	14.5	8.7	3.6	4.5	3.6	2.3	1.8	2.1
21074	N° de heladas	3.0	3.0	1.0	6.0	5.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	1.3	1.3	0.5	2.6	2.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21077	N° de heladas	36.0	48.0	27.0	36.0	10.0	16.0	2.0	6.0	4.0	1.0	0.0	0.0
	Frecuencia	15.0	20.0	14.1	15.0	4.2	6.1	0.8	2.5	1.7	0.4	0.0	0.0
21080	N° de heladas	105.0	95.0	77.0	88.0	65.0	48.0	27.0	22.0	24.0	10.0	7.0	6.0
	Frecuencia	40.4	36.5	37.0	33.8	25.0	16.8	10.4	8.5	9.2	3.8	2.7	2.1
21081	N° de heladas	143.0	135.0	94.0	104.0	64.0	62.0	35.0	19.0	11.0	7.0	5.0	9.0
	Frecuencia	49.3	46.6	40.5	35.9	22.1	19.4	12.1	6.6	3.8	2.4	1.7	2.8

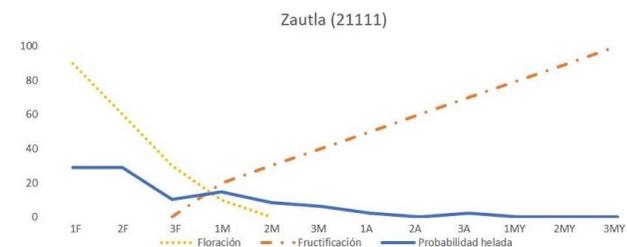
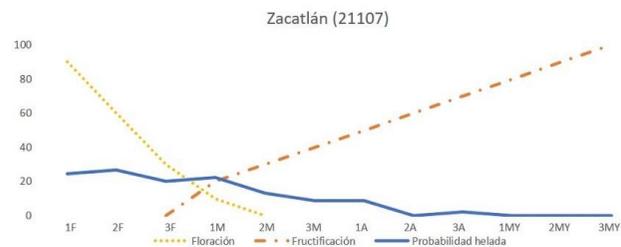
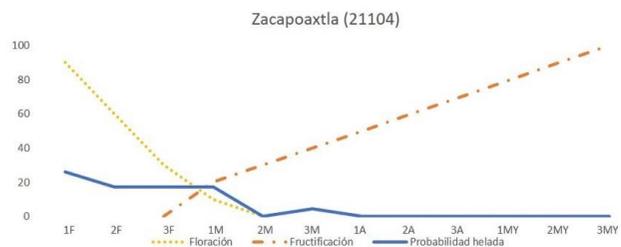
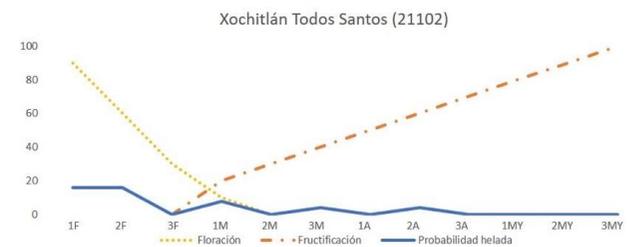
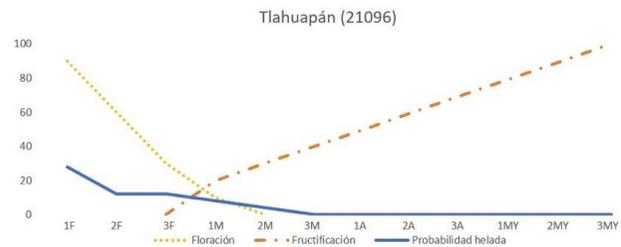
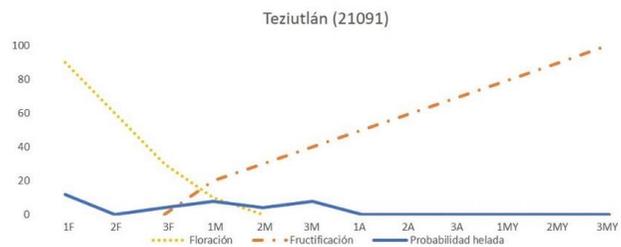
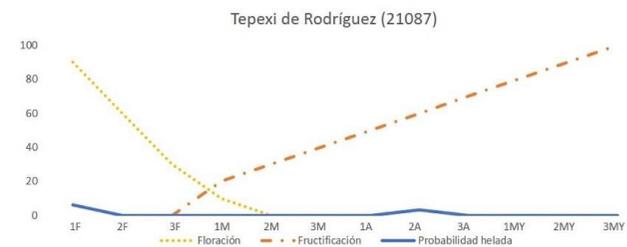
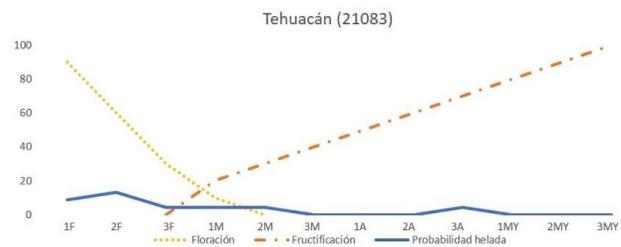
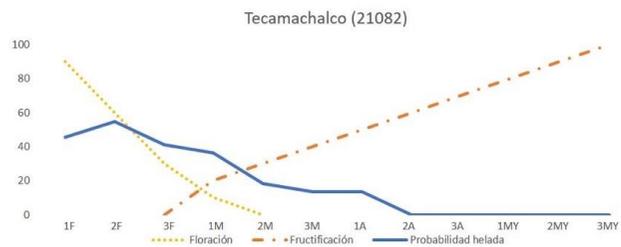
21082	N° de heladas	30.0	28.0	15.0	14.0	5.0	5.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	13.6	12.7	8.5	6.4	2.3	2.1	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21083	N° de heladas	2.0	4.0	5.0	2.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	0.9	1.7	2.7	0.9	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21087	N° de heladas	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
21091	N° de heladas	5.0	0.0	3.0	3.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	2.0	0.0	1.5	1.2	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21096	N° de heladas	11.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	4.4	1.6	1.5	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21098	N° de heladas	8.0	6.0	3.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	2.2	1.7	1.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21102	N° de heladas	8.0	6.0	0.0	2.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	3.2	2.4	0.0	0.8	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
21104	N° de heladas	9.0	5.0	9.0	6.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	3.9	2.2	4.9	2.6	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21107	N° de heladas	22.0	21.0	14.0	19.0	7.0	4.0	5.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	4.9	4.7	3.9	4.2	1.6	0.8	1.1	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
21111	N° de heladas	26.0	27.0	15.0	12.0	7.0	4.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	5.4	5.6	3.9	2.5	1.5	0.8	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0

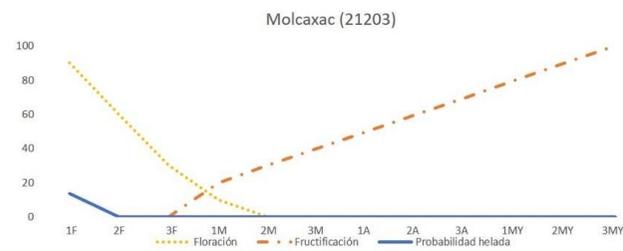
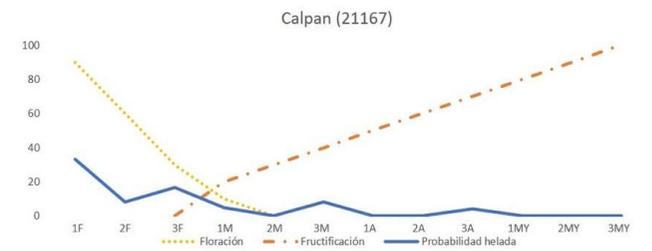
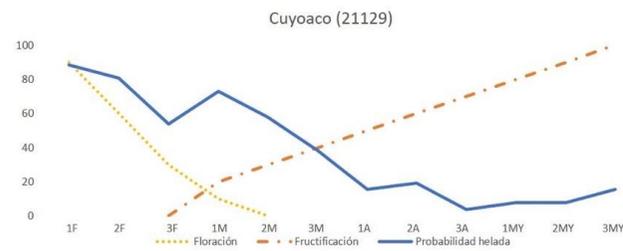
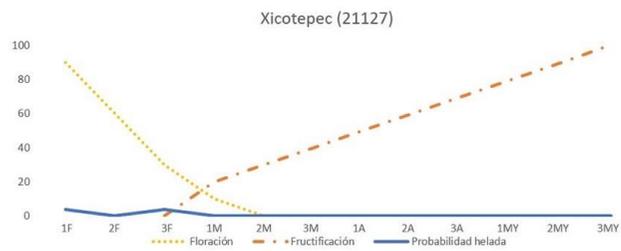
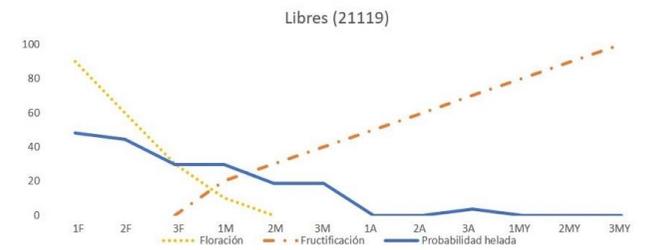
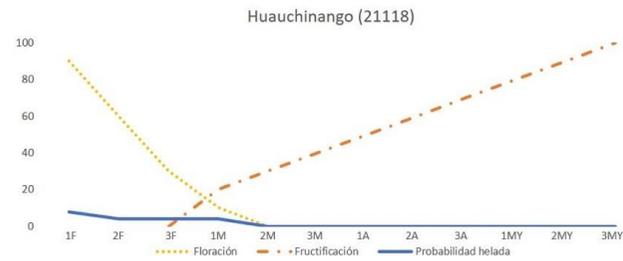
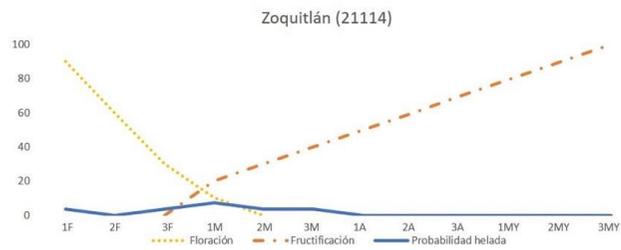
21114	N° de heladas	1.0	0.0	2.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	0.4	0.0	0.9	0.7	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21117	N° de heladas	36.0	36.0	21.0	31.0	12.0	13.0	1.0	4.0	0.0	0.0	1.0	0.0
	Frecuencia	15.0	15.0	10.9	12.9	5.0	4.9	0.4	1.7	0.0	0.0	0.4	0.0
21118	N° de heladas	7.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	2.7	0.8	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21119	N° de heladas	37.0	22.0	18.0	22.0	13.0	9.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	13.7	8.1	8.3	8.1	4.8	3.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
21127	N° de heladas	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	0.4	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21129	N° de heladas	83.0	65.0	41.0	55.0	25.0	21.0	4.0	11.0	1.0	2.0	7.0	13.0
	Frecuencia	31.9	25.0	19.7	21.2	9.6	7.3	1.5	4.2	0.4	0.8	2.7	4.5
21167	N° de heladas	14.0	2.0	6.0	5.0	0.0	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	5.8	0.8	3.1	2.1	0.0	0.8	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
21203	N° de heladas	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Frecuencia	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Anexo 5. Riesgo de heladas tardías en el aguacate









Anexo 6. Descripción de los valores de cambio de aptitud bajo tres modelos (2015-2039)

Municipio	Valor	Descripción
Ajalpan	9	Posibilidad media de aumento en condiciones óptimas. Incremento en las condiciones aptas
Aquixtla	9	Baja posibilidad de aumento en condiciones óptimas. Incremento en las condiciones aptas
Atempan	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Atexcal*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Baja posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Atlixco	5	Descenso en las condiciones óptimas. Incremento en las condiciones aptas
Caltepec*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Baja posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Cohuecan	5	Descenso en las condiciones óptimas. Alta posibilidad de aumento en las condiciones aptas
Coxcatlán	5	Descenso en las condiciones óptimas. Incremento en las condiciones aptas
Cuautempan	1	Alta posibilidad de disminución en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Cuautinchán*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Chapulco*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Baja posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Chichiquila	5	Descenso en las condiciones óptimas. Incremento en las condiciones aptas
Chietla*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en en las condiciones aptas
Chignautla	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Chila*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en en las condiciones aptas
Chilchotla	5	Baja posibilidad de disminución en condiciones óptimas. Incremento en las condiciones aptas
Guadalupe Victoria*	4	Se mantienen las condiciones actuales
Huaquechula*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Huauchinango	7	Posibilidad media de aumento en las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Hueyapan	7	Posibilidad media de aumento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Izúcar de Matamoros*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Baja posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Juan Galindo*	7	Baja posibilidad de aumento en condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Molcaxac*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Alta posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Nealtican*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Petlalcingo*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Baja posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Quimixtlán	9	Posibilidad media de aumento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
San Andrés Cholula*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Baja posibilidad de disminución en las condiciones aptas
San Jerónimo Tecuanipan*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Alta posibilidad de disminución en las condiciones aptas
San Pedro Cholula*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Alta posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Santa Isabel Cholula*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Baja posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Tehuacán*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Tepexi de Rodríguez*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Tetela de Ocampo	9	Posibilidad media de aumento en las condiciones óptimas y aptas

Teteles de Ávila Castillo	4	Se mantienen las condiciones actuales
Teziutlán	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Tianguismanalco*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Tlaltenango*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Tlatlauquitepec	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Tochimilco	5	Descenso en las condiciones óptimas. Incremento en las condiciones aptas
Vicente Guerrero	9	Incremento en condiciones óptimas y aptas
Xiutetelco	7	Incremento en las condiciones óptimas. Alta posibilidad de disminución en las condiciones aptas
Xochiapulco	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Yaonahuac	7	Alta posibilidad de aumento en condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Zacapala*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Zacapoxtla	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Zacatlan	7	Incremento en las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Zapotitlán*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Zautla	9	Posibilidad media de aumento en las condiciones óptimas. Alta posibilidad de aumento en las condiciones aptas
Zoquitlán	7	Incremento en las condiciones óptimas. Alta posibilidad de disminución en las condiciones aptas

*municipios que no tienen superficie bajo la categoría apta en el escenario base

Anexo 7. Descripción de los valores de cambio de aptitud bajo tres modelos (2045-2069)

Municipio	Valor	Descripción
Ajalpan	7	Incremento en las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Aquixtla	9	Incremento en condiciones óptimas y aptas
Atempan	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Atexcal*	4	Se mantienen las condiciones actuales
Atlixco	1	Descenso en condiciones óptimas y aptas
Caltepec*	2	Se mantienen las condiciones óptimas Descenso en las condiciones aptas
Cohuecan	1	Descenso en condiciones óptimas y aptas
Coxcatlán	1	Descenso en las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Cuautepec	1	Alta posibilidad de disminución en las condiciones óptimas. Posibilidad media de disminución en las condiciones aptas
Cuauintlán*	6	Se mantienen las condiciones óptimas. Posibilidad media de aumento en condiciones aptas
Chapulco*	6	Se mantienen las condiciones óptimas. Incremento en condiciones aptas
Chichiquila	5	Posibilidad media de disminución en las condiciones óptimas. Posibilidad media de aumento en condiciones aptas
Chietla*	2	Se mantienen las condiciones óptimas Descenso en las condiciones aptas
Chignautla	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Chila*	2	Se mantienen las condiciones óptimas Descenso en las condiciones aptas
Chilchotla	9	Incremento en condiciones óptimas y aptas
Guadalupe Victoria*	4	Se mantienen las condiciones actuales
Huaquechula*	2	Se mantienen las condiciones óptimas Descenso en las condiciones aptas
Huauchinango	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Hueyapan	7	Alta posibilidad de aumento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Izúcar de Matamoros*	2	Se mantienen las condiciones óptimas Descenso en las condiciones aptas
Juan Galindo*	7	Alta posibilidad de aumento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Molcaxac*	2	Se mantienen las condiciones óptimas Descenso en las condiciones aptas
Nealtican*	6	Se mantienen las condiciones óptimas. Incremento en condiciones aptas
Petlalcingo*	2	Se mantienen las condiciones óptimas Descenso en las condiciones aptas
Quimixtlán	9	Incremento en las condiciones óptimas. Posibilidad media de aumento en las condiciones aptas
San Andrés Cholula*	4	Se mantienen las condiciones actuales
San Jerónimo Tecuanipan*	4	Se mantienen las condiciones actuales
San Pedro Cholula*	4	Se mantienen las condiciones actuales
Santa Isabel Cholula*	4	Se mantienen las condiciones actuales
Tehuacán*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Tepexi de Rodríguez*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Tetela de Ocampo	9	Incremento en las condiciones óptimas. Posibilidad media de aumento en las condiciones aptas
Teteles de Ávila Castillo	4	Se mantienen las condiciones actuales
Teziutlán	7	Incremento en condiciones óptimas. Descenso en condiciones aptas

Tianguismanalco*	6	Se mantienen las condiciones óptimas. Incremento en condiciones aptas
Tlaltenango*	6	Se mantienen las condiciones óptimas. Incremento en condiciones aptas
Tlatlauquitepec	7	Incremento en condiciones óptimas. Descenso en condiciones aptas
Tochimilco	5	Descenso en condiciones óptimas. Incremento en condiciones aptas
Vicente Guerrero	9	Incremento en condiciones óptimas y aptas
Xiutetelco	9	Incremento en condiciones óptimas y aptas
Xochiapulco	7	Incremento en condiciones óptimas. Descenso en condiciones aptas
Yaonahuac	7	Incremento en condiciones óptimas. Descenso en condiciones aptas
Zacapala*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Zacapoaxtla	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Zacatlan	9	Incremento en condiciones óptimas y aptas
Zapotitlán*	2	Se mantienen las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas
Zautla	9	Incremento en condiciones óptimas y aptas
Zoquitlán	7	Incremento en las condiciones óptimas. Descenso en las condiciones aptas

*municipios que no tienen superficie bajo la categoría apta en el escenario base

Anexo 8. Descripción de los componentes de la vulnerabilidad socioambiental de los municipios productores de aguacate en Puebla

Muy alta

Municipio	Costo de producción				Ingresos y dependientes		Limitantes ambientales			Organización y financiamiento		
	Propiedad	Tractor	Químicos	Personal	Origen	Dependientes	Problemática	Cambio aptitud	Degradación	Sociedades	Asesoría	Seguro
CUAUTEMPAN	0%	161	27%	3594	83%	4480	64%	6	77%	5	51	1%
SAN ANDRÉS CHOLULA	7%	1232	75%	1272	68%	4746	58%	5	57%	8	11	0%

Alta

Municipio	Costo de producción				Ingresos y dependientes		Limitantes ambientales			Organización y financiamiento		
	Propiedad	Tractor	Químicos	Personal	Origen	Dependientes	Problemática	Cambio aptitud	Degradación	Sociedades	Asesoría	Seguro
VICENTE GUERRERO	1%	396	48%	33170	81%	15202	87%	1	10%	7	6	1%
CHILCHOTLA	3%	43	69%	6271	82%	11166	96%	4	3%	18	17	1%
QUIMIXTLÁN	6%	5	54%	7723	84%	14124	96%	1	0%	6	7	1%
CHIGNAUTLA	42%	182	31%	2622	69%	8027	85%	2	10%	13	14	0%
SAN PEDRO CHOLULA	4%	1202	81%	1062	81%	4431	60%	5	1%	7	6	0%
ATEMPAN	2%	193	49%	4599	66%	8654	83%	2	42%	19	20	0%
CALTEPEC	2%	303	3%	732	77%	3044	90%	5	15%	14	8	1%
MOLCAXAC	2%	928	18%	2251	88%	2819	64%	5	39%	7	15	1%
TEZIUTLÁN	15%	8	4%	2955	45%	6327	70%	2	74%	12	13	0%

Media

Municipio	Costo de producción				Ingresos y dependientes		Limitantes ambientales			Organización y financiamiento		
	Propiedad	Tractor	Químicos	Personal	Origen	Dependientes	Problemática	Cambio aptitud	Degradación	Sociedades	Asesoría	Seguro
ATLIXCO	28%	4098	79%	14575	90%	18976	44%	4	14%	92	113	4%
TOCHIMILCO	13%	953	72%	7599	93%	7922	41%	4	8%	22	26	2%
GUADALUPE VICTORIA	13%	1204	65%	3184	89%	5749	47%	3	17%	17	30	2%
HUAUCHINANGO	3%	151	21%	9646	84%	10927	74%	2	29%	32	54	1%
SAN JERÓNIMO TECUANIPAN	8%	874	87%	2346	86%	3043	43%	5	1%	7	9	3%
SANTA ISABEL CHOLULA	23%	1030	84%	5199	87%	3621	41%	5	31%	31	32	5%
TEPEXI DE RODRÍGUEZ	9%	786	62%	4137	88%	6220	46%	5	11%	16	20	3%
TIANGUISMANALCO	13%	971	72%	1823	90%	3447	69%	5	1%	13	11	3%
ZACAPOAXTLA	10%	715	61%	16340	65%	15194	63%	2	18%	39	34	1%
CHICHQUILA	11%	26	25%	5869	62%	15199	58%	4	13%	14	49	0%
TEHUACÁN	3%	1518	40%	6548	74%	6208	51%	5	43%	52	36	2%
CUAUTINCHÁN	2%	1089	53%	1863	72%	3650	40%	5	11%	3	9	1%
NEALTICAN	3%	389	91%	503	82%	1515	78%	5	0%	0	0	1%
TLALTENANGO	8%	387	90%	455	76%	1129	49%	5	13%	20	5	1%
ZAUTLA	4%	742	52%	6218	59%	6129	90%	1	6%	6	13	0%
PETLALCINGO	4%	609	11%	953	59%	3497	86%	5	6%	0	0	2%
ZACAPALA	3%	303	29%	1097	84%	1903	82%	5	1%	0	5	1%
TETELES DE ÁVILA CASTILLO	3%	31	49%	798	44%	731	63%	3	52%	0	6	1%

Baja

Municipio	Costo de producción				Ingresos y dependientes		Limitantes ambientales			Organización y financiamiento		
	Propiedad	Tractor	Químicos	Personal	Origen	Dependientes	Problemática	Cambio aptitud	Degradación	Sociedades	Asesoría	Seguro
TLATLAUQUITEPEC	13%	849	71%	17220	78%	21368	49%	2	13%	64	205	1%
HUAQUECHULA	29%	2645	76%	6797	79%	10171	38%	5	0%	89	75	4%
IZÚCAR DE MATAMOROS	3%	2890	68%	13983	88%	8869	38%	5	1%	51	112	7%
ZACATLÁN	10%	935	56%	21959	77%	20454	69%	2	19%	61	140	1%
AJALPAN	3%	500	28%	14531	73%	20592	73%	1	1%	31	121	2%
TETELA DE OCAMPO	9%	380	48%	7009	86%	10255	75%	1	7%	30	47	1%
COXCATLÁN	2%	430	46%	5006	84%	6543	75%	4	39%	45	28	12%
ZOQUITLÁN	6%	19	32%	6478	85%	11298	60%	2	2%	41	29	0%
XIUTETELCO	5%	110	25%	2780	51%	10592	86%	2	3%	9	8	0%
CHAPULCO	1%	267	8%	1288	58%	1381	59%	5	0%	3	16	3%
CHILA	5%	439	35%	1179	83%	1922	62%	5	7%	7	3	1%
XOCHIAPULCO	2%	0	32%	1512	77%	1958	49%	2	42%	6	14	0%
ATEXCAL	1%	402	7%	959	53%	1926	73%	5	18%	5	13	1%
ZAPOTITLÁN	0%	356	1%	777	42%	3225	69%	5	10%	0	4	1%

Muy baja

	Costo de producción				Ingresos y dependientes		Limitantes ambientales			Organización y financiamiento		
Municipio	Propiedad	Tractor	Químicos	Personal	Origen	Dependientes	Problemática	Cambio aptitud	Degradación	Sociedades	Asesoría	Seguro
CHIETLA	6%	3004	74%	8576	88%	7559	22%	5	47%	95	127	47%
AQUIXTLA	10%	612	64%	1757	85%	3955	53%	1	32%	34	78	32%
COHUECAN	8%	579	88%	1063	84%	1935	30%	4	0%	13	27	0%
HUEYAPAN	8%	6	6%	1679	91%	5595	41%	2	15%	8	70	15%
YAONÁHUAC	6%	17	33%	2799	81%	3313	48%	2	2%	22	26	2%
JUAN GALINDO	2%	0	0%	156	54%	318	60%	2	0%	0	4	0%