



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

CAMPUS SAN MARTÍN TEXMELUCAN

DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**FACTORES DETERMINANTES EN EL CRECIMIENTO DE LA AGRICULTURA
PROTEGIDA Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN SAN SALVADOR EL VERDE,
PUEBLA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

C. Jesus Guevara Brindis

18060008

ASESOR:

Dr. Jacinto Sandoval Lira

SAN MARTÍN TEXMELUCAN, PUE., a 29 de mayo de 2023.

	Nombre del documento: Dictamen para Titulación Integral	Código: ITSSMT-AC-NOR-01-FO-04	
	Referencia del Documento: Lineamiento para la Titulación Integral	Revisión: 2	

San Martín Texmelucan, Pue., a **23 de febrero de 2023**
Asunto: Dictamen para Titulación Integral

C. JESUS GUEVARA BRINDIS
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E

En respuesta a su solicitud de titulación integral con el proyecto **FACTORES DETERMINANTES EN EL CRECIMIENTO DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN SAN SALVADOR EL VERDE, PUEBLA**, me es grato informarle que fue **aceptado/a**, en modalidad **Tesis**, y se confirma como asesor/a el/la **C. Jacinto Sandoval Lira** y como revisores al **C. Josset Sánchez Olarte** y al **C. Elí Ramírez Vázquez**.

Por lo que le solicito ponerse en contacto con sus asesor/a, en caso de ser necesario.

Además, le informo que deberá pasar al Departamento de Control Escolar, a que le revisen su documentación.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Formación Tecnológica de Vanguardia para el Desarrollo Regional"



 Instituto Tecnológico Superior
 de San Martín Texmelucan
GUADALUPE MONJARÁS GONZÁLEZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL
DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

c.c.p. Subdirección Académica.- psc
 Departamento de Control Escolar.- psc
 Expediente

	Nombre del documento: Liberación de Proyecto para la Titulación Integral	Código: ITSSMT-AC-NOR-01-FO-03	
	Referencia del Documento: Lineamiento para la Titulación Integral	Revisión: 2	

San Martín Texmelucan, Pue., a **17 de marzo de 2023**
 Asunto: Liberación de proyecto para la titulación integral.

C. DAMIÁN HUERTA GARCÍA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA DEL
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre de la/del egresada/o:	Jesús Guevara Brindis
Carrera:	Ingeniería Ambiental
No. de control:	18060008
Nombre del proyecto:	FACTORES DETERMINANTES EN EL CRECIMIENTO DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN SAN SALVADOR EL VERDE, PUEBLA.
Producto:	Tesis

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros/as egresados/as.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
 "Formación Tecnológica de Vanguardia para el Desarrollo Regional"*


 Instituto Tecnológico Superior
 San Martín Texmelucan
GUADALUPE MONJARÁS GONZÁLEZ
JEFA DE DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Nombre y firma del asesor/a	Nombre y firma del revisor/a*	Nombre y firma del revisor/a *
 Jacinto Sandoval Lira	 Josset Sánchez Olarte	 Elí Ramírez Vázquez

* Solo aplica para el caso de tesis o tesina.

c.c.p.- Expediente

	Nombre del documento: Autorización de entrega de informe de Titulación.	Código: ITSSMT-AC-NOR-01-FO-08	
	Referencia del Documento: Lineamiento para la Titulación Integral	Revisión: 2	

San Martín Texmelucan, Puebla a **25 de mayo de 2023**

**C. JESÚS GUEVARA BRINDIS
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E**

De acuerdo con la normatividad vigente de nuestro instituto y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el comité revisor le hizo respecto a su informe de titulación integral titulado: **“FACTORES DETERMINANTES EN EL CRECIMIENTO DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA Y SU IMPACTO AMBIENTAL EN SAN SALVADOR EL VERDE, PUEBLA”** comunico a Usted que:

HA SIDO LIBERADO/A Y SE LE AUTORIZA PARA QUE PROCEDA A LA FORMALIZACIÓN DE ESTE

Para lo cual deberá entregar su documento digital a la Subdirección Académica, en un plazo de diez días hábiles contados a partir de la fecha del presente.

Es importante mencionar que usted deberá elegir la manera en que conservará su trabajo de titulación (libro, disco, etc.).

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica y Desarrollo Regional
“Formación Tecnológica de Vanguardia”*



 Instituto Tecnológico Superior
 de San Martín Texmelucan
DIVISIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL
 Jefa de la División de Ingeniería Ambiental

c.c.p. Expediente

Dedicatoria

La presente Tesis está dedicada a la familia Brindis Martínez, cuyos pilares ya no se encuentran en vida con nosotros, siendo los abuelos Juan y Chabelo, y la abuelita Felicitas; pero, aun así, agradecido con Dios porque estoy en presencia de mi abuelita Enriqueta, Tío Martín y Joaquín, mi Mamá Tomasa y mis hermanos Daniela, Ariadna y Miguel Brindis. Por último, pero no menos importante, aquel que ya es miembro de esta familia, Jorge, que nos ha apoyado en los momentos difíciles.

Agradecimientos

- Agradezco al Dr. Jacinto Sandoval Lira, por su orientación y apoyo emocional en la realización de este trabajo de tesis, por asesorarme y guiarme en la composición de este escrito, por compartirme sus conocimientos, ofrecerme un sitio en el área de investigación del ITSSMT y sobre todo, por la amistad brindada durante el tiempo en que ha estado laborando en esta institución.
- Agradezco a Perla Castillo Martínez, por su apoyo incondicional, emocional y brindarme aquella comodidad en la realización de este trabajo de tesis, por compartirme sus conocimientos y por la amistad que me ofreció durante el tiempo en que ha estado asistiendo en esta institución.
- Agradezco al Mtro. Elí Ramírez Vázquez por su orientación y apoyo en la realización de este proyecto, por compartirme sus conocimientos y asesorarme en los procedimientos que fueron implementados en este trabajo de tesis y por la amistad brindada.
- Agradezco al Dr. Josset Sánchez Olarte, por la oportunidad que me ofreció para realizar residencia profesional bajo su tutela, por asesorarme y compartirme sus conocimientos en distintas áreas de investigación y por la amistad brindada durante el poco tiempo en el cual he estado interactuando con él.
- Agradezco a todos los docentes de Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico Superior de México, Campus San Martín Texmelucan que me adiestraron y capacitaron en el tiempo que asistí a esta institución.
- Agradezco al Cuerpo Académico ITESSMT-CA-7 Ciencia Básica en Ingeniería Ambiental, por el alojamiento de la investigación que se presenta.

Resumen

Los factores que impulsan el crecimiento de la agricultura protegida en San Salvador el Verde están influenciados por las capacidades económicas de los agricultores locales, como su capacidad emprendedora y su motivación por mejorar su calidad de vida. Además, la implementación de estrategias de producción y cosecha en cultivos como la floricultura de rosa y crisantemo ha permitido un desarrollo significativo de esta actividad. En este estudio se analizaron las variables socioeconómicas y edafoclimáticas para identificar los factores más importantes que favorecen la implementación de estructuras para la agricultura protegida. Los resultados indican que el aumento en la superficie destinada a la agricultura protegida se debe a factores como los precios de los materiales de construcción, los apoyos gubernamentales para impulsar la agricultura protegida de traspatio, y la demanda del producto motivada por aspectos socioculturales. Además, se presenta un modelo de crecimiento exponencial de la agricultura protegida para el periodo de 2010-2022, generado mediante sistemas de información geográfica. Finalmente, se muestra que los impactos ambientales al suelo son mínimos debido a la agricultura protegida, lo que indica que esta actividad puede ser una alternativa sustentable para la producción de flores en la región.

Índice general

Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Índice general	VII
Índice de tablas	X
Índice de figuras	XI
Capítulo I Introducción	2
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Problema de investigación	4
1.4 Justificación	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo General	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
1.6 Hipótesis	5
1.7 Propósito del estudio	5
1.8 Preguntas de investigación	6
1.9 Definición de términos	6
Capítulo II Revisión de la literatura	9
2.1 El desarrollo de la floricultura en agricultura protegida	9
2.1.1 Agricultura en México	9
2.1.2 Agricultura protegida en México	10
2.1.3 Tipos de estructura para la agricultura protegida	10
2.1.4 Estaciones y períodos vegetativos de los cultivos	11

2.1.5	La floricultura en agricultura protegida en México	11
2.2	Tecnologías digitales y su uso en agricultura protegida	12
2.2.1	Cartografía en México	12
2.2.2	Sistemas de Información Geográfica	14
2.2.3	Uso de sensores remotos en los SIG	15
2.2.4	Tipos de imágenes satélites	16
2.3	Impacto ambiental originado por la agricultura protegida	17
2.3.1	Impactos ambientales	17
2.3.2	Tipos de contaminación	19
2.3.3	La contaminación del suelo en cultivos de agricultura protegida	20
2.3.4	Parámetros importantes en el análisis de suelos	21
2.3.5	Niveles nutrimentales de los suelos	22
2.4	Caracterización del Crisantemo	22
2.4.1	Origen	22
2.4.2	Taxonomía	23
2.4.3	Fonología	23
2.4.4	Estados Fenológicos del Crisantemo	23
Capítulo III Metodología		27
3.1	Análisis de los factores que propician el crecimiento de la agricultura protegida	27
3.1.1	Factores socioeconómicos	27
3.1.2	Factores edafoclimáticos	27
3.2	Análisis de imágenes satelitales en instalaciones destinadas a la agricultura protegida	28
3.2.1	Plataformas digitales	28
3.2.2	Evolución de la agricultura protegida	28
3.3	Evaluación de la contaminación del suelo en cultivos de agricultura protegida	29
3.3.1	Muestreo de suelo	29
Capítulo IV Resultados y discusión		31
4.1	Factores determinantes en el desarrollo de la agricultura protegida	32
4.1.1	Factores socioeconómicos	32
4.1.2	Factores edafoclimáticos	34
4.2	Determinación del crecimiento de la agricultura protegida a partir de imágenes satelitales	37
4.2.1	Identificación de estructuras destinadas a la agricultura protegida	38
4.2.2	La agricultura protegida en 2010	40
4.2.3	La agricultura protegida en 2015	42
4.2.4	La agricultura protegida en 2020	45

4.2.5	La agricultura protegida en 2022	48
4.2.6	Porcentaje anual del crecimiento para el periodo 2010-2022.	50
4.2.7	Modelo de crecimiento de la agricultura protegida	51
4.3	Impacto ambiental causado por la agricultura protegida	56
4.3.1	Contaminación a los recursos naturales	56
4.3.2	Contaminación de percepción: visual y térmica	59
	Conclusiones	62
	Referencias	63
	Anexo A: Evidencias del análisis de suelos	69
A.1	Evidencias del análisis de suelos	69

Índice de tablas

Tabla 2.2.1	Escalas numéricas empleadas por INEGI.	14
Tabla 2.3.1	Clasificación de impactos ambientales.	17
Tabla 4.1.1	Estratificación socioeconómica de la población de San Salvador el Verde.	32
Tabla 4.1.2	Comparación de características y costos por m ² de invernadero en México.	33
Tabla 4.2.1	Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2010.	42
Tabla 4.2.2	Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2010.	42
Tabla 4.2.3	Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2015.	44
Tabla 4.2.4	Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2015.	44
Tabla 4.2.5	Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2020.	45
Tabla 4.2.6	Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2020.	47
Tabla 4.2.7	Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2022.	48
Tabla 4.2.8	Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2022.	48
Tabla 4.2.9	Crecimiento de la agricultura protegida en San Salvador el Verde en el periodo del año 2010 al año 2022.	51
Tabla 4.2.10	Coefficientes de determinación (R^2) para los modelos de ajuste para el crecimiento de la agricultura protegida.	52
Tabla 4.3.1	Análisis nutrimental de suelo para cultivo de Crisantemo en invernadero de San Salvador el Verde.	58
Tabla 4.3.2	Valores nutrimentales de suelo recomendado para el cultivo de Crisantemos.	58

Índice de figuras

Figura 2.4.1	Estados fenológicos de <i>Chrysanthemum</i> sp. (A) Vegetativo I (luz), (B) Vegetativo II (sin luz), (C) Botón arroz, (D) Botón arveja, (E) Botón garbanzo, (F) Mostrando color, (G) Cosecha.	24
Figura 4.0.1	Localización del municipio de San Salvador el Verde en el estado de Puebla, México.	31
Figura 4.1.1	Tipos de suelos en el municipio de San Salvador el Verde.	36
Figura 4.1.2	Tipos de clima en el municipio de San Salvador el Verde.	37
Figura 4.1.3	Régimen de humedad en el municipio de San Salvador el Verde.	38
Figura 4.2.1	Imagen satelital de las instalaciones de invernaderos de San Salvador el Verde, Puebla.	39
Figura 4.2.2	Invernaderos en San Salvador el Verde, 2010.	41
Figura 4.2.3	Invernaderos en San Salvador el Verde, 2015.	43
Figura 4.2.4	Invernaderos en San Salvador el Verde, 2020.	46
Figura 4.2.5	Invernaderos en San Salvador el Verde, 2022.	49
Figura 4.2.6	Modelos de crecimiento del número de invernaderos en el periodo del año 2010 al año 2022.	52
Figura 4.2.7	Modelos de crecimiento de la superficie (ha) de invernaderos en el periodo del año 2010 al año 2022.	53
Figura 4.2.8	Superficie identificada de Rosa en agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla.	54
Figura 4.2.9	Superficie identificada de Rosa en agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla. Datos del censo del INEGI 2016, polígonos en blanco (arriba), datos de la investigación, polígonos en rosa (abajo).	55
Figura 4.3.1	Croquis del invernadero de Crisantemo ubicado en San Salvador el Verde	57
Figura 4.3.2	Etapas de fenológicas del cultivo de Crisantemo identificadas en el invernadero	57
Figura 4.3.3	Invernaderos multimodulares de San Salvador el Verde, 2022.	59
Figura 4.3.4	Temperatura superficial de San Salvador el Verde, Puebla, mayo del 2022.	61
Figura A1	Procedimiento del análisis nutrimental del suelo en el laboratorio del TecNM campus ITSSMT.	69
Figura A2	Continuación de figura A1.	70

Capítulo I
INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El aumento de la población mundial se concentra en áreas urbanas, ocasionando la demanda de más alimentos. La respuesta para producir alimentos en zonas urbanas ha sido la agricultura protegida (*agricultura con ambiente controlado*). Esta tecnología, también es utilizada para producir alimentos en zonas agrícolas rurales. Por otro lado, los individuos sociales se han vuelto más exigentes respecto a los alimentos que consumen y la forma como se producen. En esta área de oportunidad, cobra importancia la agricultura periurbana que debe ser capaz de suministrar a los consumidores rurales y urbanos; alimentos frescos, sanos, nutritivos e inocuos en cantidades suficientes, además de generar un acercamiento entre productores y consumidores (Segrelles-Serrano, 2015). Conjuntamente, una característica de nuestra época es el crecimiento de las ciudades, debido al aumento de la migración que se establece en las zonas periurbanas. Poblaciones que presentan, por lo general, una serie de necesidades que deben ser atendidas bajo un desarrollo sostenible para generar un valor económico, social, paisajista y ecológico (Hernández-Puig, 2016).

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2021), confirma que en México, la agricultura protegida también ha tomado gran importancia; se reportan 47,795 (ha¹) sembradas para la producción de hortalizas, frutales y ornamentales, superficie que registra un crecimiento de 2,700 (ha) anuales. Los informes de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2018), muestran que los cultivos con más producción son el tomate rojo, pepino, chile y berenjena. Con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2015), en el estado de Puebla existían 4,880 instalaciones de agricultura protegida (invernaderos, casa sombra, techo sombra, macro túnel, micro túnel y pabellón) con una superficie de 1,284.51 (ha), cultivadas principalmente con tomate, jitomate, chile, pepino, rosa de corte y zarzamora. La agricultura protegida se reportó en 138 municipios del estado de Puebla, sin embargo, solo se concentra en 27 de ellos. Para promover la agricultura protegida en el estado de Puebla, se han llevado a cabo diferentes programas sociales, por ejemplo, el Programa Integral de Desarrollo Rural en su componente de Agricultura Familiar, Periurbana y Traspatio (SAGARPA, 2015a).

En la actualidad, en el estado de Puebla, específicamente en el municipio de San Salvador el Verde, se presenta un incremento por el uso de tecnologías aplicadas a la agricultura protegida, no obstante a su condición de urbanidad por la actividad mercantil e infraestructura para vivienda, existen productores que siguen ejerciendo la agricultura en diferentes condiciones. En la dinámica que prevalece en el municipio, además de los servicios de turismo y comercio, resaltan condiciones socioeconómicas y tecnológicas en la que se desarrolla la agricultura protegida.

El presente trabajo de tesis tiene como marco de referencia el municipio de San Salvador el Verde, Puebla, México, el cual se caracteriza por la producción de flores en agricultura protegida. En este contexto,

¹hectáreas

es importante identificar tres aspectos: (1) *Los factores que motivan a los agricultores a emprender esta práctica e identificar cuales son determinantes en el crecimiento de la agricultura protegida en el municipio;* (2) *La evolución del crecimiento de la agricultura protegida usando tecnologías digitales;* (3) *Evaluar el impacto ambiental en el suelo, causado por el uso desmedido de fertilizantes de origen mineral y plaguicidas en la agricultura protegida.* Los resultados pretenden mostrar los principales factores de crecimiento de la actividad, un análisis geoespacial de la evolución del aumento en número de los invernaderos y los impactos ambientales en el suelo causados por el desarrollo de la agricultura protegida.

1.2. Antecedentes

En un primer intento por conocer los factores determinantes que toman en cuenta los agricultores de San Salvador el Verde, Puebla, para ejercer la agricultura protegida y los impactos ambientales que se generan a través de esta acción, fue necesario realizar una búsqueda de información que permitirá exponer de forma clara aquellas investigaciones que se tienen sobre el estudio en forma de antecedentes.

De acuerdo con [Moreno-Reséndez et al. \(2011\)](#) en México, la superficie (ha) de agricultura protegida ha evolucionado desde 1998 a 2008 a una Tasa Media de Crecimiento Anual (TMCA) de 34.5 %, de igual manera, han clasificado aquellas estructuras destinadas a la agricultura protegida conforme a la tecnología que emplean, siendo el invernadero de baja tecnología, el de menor costo (\$70.00/m²), los de tecnología media (\$250/m²) y por último los de alta tecnología que están 100 % automatizados (\$1,500/m²). Para el 2008, de las 8,834 (ha) con agricultura protegida, el 49 % eran de invernaderos tecnificados y de mediana tecnificación y el 51 % de malla sombra. Es decir, la dinámica de la TMCA corresponde, en un porcentaje importante del 70 %, al crecimiento de los invernaderos de mediana y baja tecnología. Con base en lo anterior, [Moreno-Reséndez et al. \(2011\)](#) concluyeron que la agricultura protegida se ejerce en su mayoría mediante instalaciones con bajo costo de construcción, en las cuales los agricultores se adaptan en gran medida a las necesidades que requieren los invernaderos.

Por otra parte, [Paz y Bruno \(2013\)](#) mencionan que el potencial que tiene la agricultura protegida, requiere en un primer momento ser identificada por las propias ciencias agrarias y sociales, para posteriormente demostrar que el esfuerzo y recursos económicos se ven reflejados en las ganancias de cualquier cultivo, o en que las pequeñas producciones tengan un rol activo que aporte a la economía del agricultor. Con ello se pretende deducir que los factores de las ciencias exactas como el conocimiento científico, naturales (disposición de recursos y vulnerabilidad), económicas (capital para invertir) y sociales tienen un gran impacto y se utilizan en la práctica y comprensión de la agricultura protegida. [Armendáriz-Erives \(2007\)](#) señala que los avances en la actividad agrícola, han contribuido a la degradación del ambiente y en los próximos 30

años las necesidades de alimentos se duplicarán: el desafío del hombre será satisfacer las demandas de una población mayor con menos tierra agrícola y agua. Por otra parte, [Salazar-Sánchez y Galicia-Martínez \(2006\)](#) consideran que uno de los efectos del cambio climático, será el ascenso de temperatura; reflejándose en un aumento de la evaporación y evapotranspiración, una reducción de la precipitación y de los escurrimientos, lo que provocará, a mediano plazo, el incremento de la desertificación y de redistribución del recurso hídrico. Las variaciones en la distribución del agua y temperatura, tendrán efectos diferenciados sobre el uso del suelo y la distribución de los seres vivos (cultivos, ganado o asociaciones vegetales naturales). De tal manera, se infiere que el crecimiento de la agricultura, ya sea protegida o a cielo abierto, impacta de manera negativa al ambiente.

1.3. Problema de investigación

La agricultura protegida es uno de los componentes esenciales de la actividad agrícola que tiene como principal función producir cultivos fuera de temporada, los cultivos son resguardados en cubiertas de plástico, malla sombra, malla antigranizo, vidrio o cualquier otro material, permitiendo tener un control de las condiciones ambientales, gracias a los diferentes métodos empleados los cuales usan tecnologías diversas. En San Salvador el Verde, se ha creado una práctica común orientada al cultivo de flores ornamentales, que va desde la producción hasta la comercialización, siendo el caso de la Rosa (*Rosa spp*) y Crisantemo (*Chrysanthemum spp*) los más cultivados. La práctica descrita de estos cultivos, considerados como los ornamentales principales, ha aumentado a través de los años, ocasionando que el suelo se utilice y explote de manera excesiva. Con el conocimiento de las circunstancias e influencias que contribuyen al desarrollo de la agricultura protegida, se podrá identificar los factores determinantes que los productores toman en cuenta para llevar a cabo dicho sistema de producción, así también como conservar e incrementar la superficie de producción y los problemas ambientales causados por la actividad en el municipio de San Salvador el Verde, Puebla.

1.4. Justificación

Con la implementación de nuevas técnicas que permiten la innovación de la agricultura en México, se ha observado a través de los años un incremento de cultivos con fines comerciales. Sin embargo, algo que se opone a dicha práctica, es lo que representa el tema de cambio y uso del suelo. Como se ha mencionado, la demanda de cultivos agrícolas, en especial aquellos que están fuera de temporada, define la cantidad de proyectos para la construcción de invernaderos en la agricultura protegida, como es el caso de la floricultura en el municipio de San Salvador el Verde. Con base en lo anterior, se *justifica* la necesidad de llevar a cabo una investigación para conocer cuáles han sido los factores que han propiciado el crecimiento de este tipo de agricultura y como ha impactado en el crecimiento socioeconómico y los problemas ambientales del

municipio de San Salvador el Verde. Aunado a ello, la investigación generará información pertinente que apoye a los productores del municipio y la región para emprender y mejorar sus sistemas de producción y sobre todo que la región sea proyectada a nivel regional, nacional e internacional.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Identificar los factores determinantes en el crecimiento de la agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla y evaluar el impacto ambiental de esta actividad.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Elaborar un diagnóstico socioeconómico y edafoclimático de la agricultura protegida en el municipio de San Salvador el Verde.
2. Realizar un análisis geoespacial de la agricultura protegida en el municipio de San Salvador el Verde para identificar posibles cambios en la superficie cultivada de rosa y crisantemo.
3. Evaluar el impacto ambiental de la agricultura protegida, caso crisantemo y rosa, en el municipio de San Salvador el Verde, a través de un análisis del uso de fertilizantes de origen mineral.

1.6. Hipótesis

El crecimiento del número de instalaciones de agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla, México, ha generado un aumento en la demanda de recursos naturales como suelo, el agua, y el aire, lo que ocasiona un impacto ambiental negativo en términos de calidad del agua, la contaminación del aire y la degradación del suelo. En este contexto: **Es factible y se espera que la implementación de prácticas sostenibles**, basadas en tecnologías innovadoras como los SIG², en la agricultura protegida pueda reducir el impacto ambiental negativo y promover la sustentabilidad en la producción de flores en la región de San Salvador el Verde.

1.7. Propósito del estudio

El propósito de este estudio gira en torno a identificar aquellos factores determinantes que influyeron de manera crucial en la práctica de la agricultura protegida, específicamente, el crecimiento de la actividad a partir del análisis de la variación temporal y espacial, y el estudio del impacto directo que tiene esta actividad económica al ambiente, en el municipio de San Salvador el Verde.

²Sistemas de Información Geográfica

1.8. Preguntas de investigación

El planteamiento de las siguientes preguntas de investigación nos ha permitido ayudar a establecer lo que se quiere abordar y así mismo, proponer adecuadamente una estrategia metodológica para resolver el problema planteado. En el presente estudio, se definieron de la siguiente manera:

1. ¿Cuáles son los factores determinantes que influyen a los agricultores de San Salvador el Verde, Puebla, para ejercer la agricultura protegida?
2. ¿Qué impactos ambientales se generan debido al crecimiento de la agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla?

1.9. Definición de términos

- **Actividad agrícola:** Actividad propia del sector de la sociedad dedicado a la agricultura como actividad económica, es decir, al aprovechamiento de los suelos para la siembra, cultivo y recolección de frutos, granos y/o vegetales para su posterior consumo y venta a otros sectores (Equipo editorial, 2022).
- **Agricultura a cielo abierto:** La agricultura a cielo abierto es aquella en la cual se llevan a cabo las tareas de preparación de la tierra, esta actividad se enfrenta al cambio climático de primera mano (Seale y Associates, 2019).
- **Agricultura periurbana:** Es el conjunto de prácticas que proporcionan alimentos y otros productos a través de la producción agrícola y los procesos relacionados con ella (transformación, distribución, comercialización, reciclaje, etc.) y que se llevan a cabo en la tierra u otros espacios, en las ciudades o las regiones circundantes de la periferia (FAO, 2018).
- **Agricultura protegida:** La agricultura protegida es aquella que se realiza bajo condiciones en las que el agricultor puede controlar algunos factores del medio ambiente. Con lo cual, minimiza el impacto que los cambios del clima ocasionan a los cultivos (SENASICA, 2016).
- **Agricultura de traspatio:** Son actividades y espacios en su mayoría a cielo abierto que áreas resguardas donde se cultiva todo tipo de vegetales y semillas de forma continua durante todo el año para su autoconsumo o bien para el desarrollo de proyectos productivos de comunidades marginadas (FIRCO, 2017).
- **Cambio climático:** Cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos que pueden ser por causas naturales y antropogénicas (UN, 2020).

- **Cosecha:** Recolección de los frutos, semillas u hortalizas de los campos en la época del año en que están maduros y aptos para uso o consumo humano (Pérez-Porto y Gardey, 2017).
- **Cultivo:** Acción de trabajar la tierra en función de que haya y así crezcan especies vegetales (Bembibre, 2022).
- **Degradación del ambiente:** Deterioro del medio ambiente reflejado por el agotamiento de recursos naturales como el aire, el agua, el suelo y la cubierta del suelo, el cual conlleva a la destrucción de ecosistemas y la extinción de la vida silvestre (SEMARNAT, 2015).
- **Desarrollo sostenible:** Concepto mediante el cual se satisfacen las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social (Acciona, 2022).
- **Impacto ambiental:** Alteración del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza. Mediante modificaciones provocadas por proyectos de infraestructura (GRN, 2020).
- **Medio ambiente:** Entorno natural de componentes físicos, químicos y biológicos, externos con el que interactúan los seres vivos (UNDP, 2019).
- **Planta ornamental:** Una planta ornamental es aquella que se cultiva y se comercializa con propósitos decorativos por sus características estéticas, como las flores, hojas, perfume, la peculiaridad de su follaje, frutos o tallos en jardines y diseños paisajísticos, como planta de interior o para flor cortada (EcuRed, 2022).

Capítulo II
REVISIÓN DE LA LITERATURA

En el presente capítulo se presenta una revisión del estado del arte de tres tópicos fundamentales para el trabajo de Tesis: *El desarrollo de la floricultura en agricultura protegida*, *las Tecnologías digitales y su uso en agricultura protegida* y *el Impacto ambiental originado por la agricultura protegida*.

2.1. El desarrollo de la floricultura en agricultura protegida

2.1.1. Agricultura en México

La agricultura es *el arte de cultivar la tierra* proveniente del latín *ager*, agri = campo y cultura (cultivo). Es una actividad que se ocupa de la producción de cultivo del suelo, el desarrollo y recogida de las cosechas, la explotación de bosques y selvas (silvicultura), la cría y desarrollo de ganado (SEDEMA, 2022).

México cuenta con un territorio nacional de 198 millones (ha) de las cuales 145 millones (el 73 %) se dedican a la actividad agropecuaria. Cerca de 30 millones (ha) son tierras de cultivo y 115 millones (ha) son de agostadero (dedicadas al cultivo de forraje). Además, los bosques y selvas cubren 45.5 millones (ha) (Corona-Ramírez, 2016). La agricultura es el principal componente en el sector agropecuario, su aportación es mucho mayor en relación con el sector pesquero, pecuario y acuícola, además permanece vigente durante todo el año con sus distintos cultivos. Esta actividad es la encargada de proveer alimentos, materias primas, y mano de obra al sector agroindustrial y de servicios. Adicionalmente, la agricultura, demanda una gran cantidad de productos industriales de primera necesidad para la producción agrícola, entre ellos: fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, maquinaria, entre otros. En el aspecto social, favorece el arraigo a sus tierras, el sustento a familias y la preservación de recursos naturales de cierto número de personas en localidades productoras. En nuestro país se practican dos tipos de agricultura: *la tradicional* o *extensiva*, en la cual el productor depende en gran parte de las lluvias, condiciones climatológicas y mano de obra no salariada, y la agricultura *comercial* o *intensiva*, que implementa tecnología de punta y mano de obra asalariada para la producción (SADER, 2018).

La agricultura *a cielo abierto* es aquella que no tiene ningún tipo de resguardo, sombra o protección que reduzca los factores climatológicos y se caracteriza por contener cultivos intensivos, por ejemplo, hortalizas como el tomate, chile, ejotes, brócoli y cultivos extensivos en producción de granos como el maíz, trigo, sorgo, frijol, soya, etc. La agricultura *protegida* se caracteriza por la implementación de cultivos hortícolas, de gran valor económico, en el cual, los invernaderos brindan un lugar con condiciones artificiales controladas que ayudan a aumentar la producción.

La agricultura en México es más que un sector productivo importante, aporta el 3.7% al Producto Interno Bruto (PIB) nacional, por tanto, las múltiples funciones de la agricultura en el desarrollo económico, social y ambiental determinan que su incidencia en el desarrollo sea mucho mayor de lo que ese indicador

implicaría (Corona-Ramírez, 2016).

2.1.2. Agricultura protegida en México

La creciente demanda de alimentos para la población en general ha ido aumentando de manera alarmante en nuestro país y en el mundo, siendo un tema de interés a todas las ciencias involucradas desde diferentes puntos de vista. Debido al potencial de las tierras ricas en nutrientes presentes en el suelo de México, el sector agropecuario ha mostrado un avance en la implementación de técnicas y tecnologías para el aprovechamiento de todos los recursos que nos ofrece el ambiente.

Distintivo del resguardo de los cultivos, la agricultura protegida, ha justificado ser una opción viable para poder controlar total o parcialmente el microclima que rodea a la planta, de acuerdo con las necesidades durante su periodo de crecimiento. Por lo tanto, la agricultura protegida, se define, como una serie de técnicas o métodos de producción que permiten resguardar y alterar el ambiente natural en el que se desarrollan los cultivos, con la intención de garantizar un crecimiento óptimo (Pérez-Andrade, 2017), un alto rendimiento en diferentes cultivos, o bien obtener cosechas fuera de temporada que no pueden obtenerse si no es con un alto riesgo de siniestro por eventos climatológicos.

En México, la superficie de agricultura protegida por malla, aumentó de 10,283 (ha) en el año 2010 a 47,254 (ha) en el año 2021 (SIAP, 2021). Debido a que los invernaderos brindan condiciones climáticas óptimas para los cultivos, mayores rendimientos y calidad de producción. Estas tecnologías representan la herramienta clave de la agricultura protegida y resaltan dos aspectos importantes, (1) la eficacia para establecer algunos de los principales elementos del clima dentro de límites determinados de acuerdo con las exigencias fisiológicas del cultivo que se pretenda implementar y (2) la propiedad de aprovechamiento que permite la mejor utilización del invernadero, tanto desde el punto tecnológico como económico.

2.1.3. Tipos de estructura para la agricultura protegida

La agricultura protegida se practica bajo diferentes tipos de estructuras que contribuyen al cuidado de los cultivos ante el cambio climático. Estas estructuras ofrecen distintas alternativas para generar las condiciones ambientales adecuadas que permitan el desarrollo de los cultivos de acuerdo con las exigencias climáticas de cada especie. También desempeñan un papel fundamental en el crecimiento del sector agrícola. La clasificación, según la, SADER (2017) es la siguiente:

1. **Invernadero:** Estructura alta y fija que permite controlar de manera eficiente los principales factores ambientales que impiden el desarrollo de los cultivos, tales como lluvias e inundaciones.

2. **Casa o malla sombra:** Regula la cantidad de luz solar que llega a las plantas, a las que también protege de las inclemencias del clima, así como de los insectos y efectos negativos del uso de pesticidas.
3. **Macrotúnel o túnel alto:** Este elemento de fácil construcción, tiene forma semicircular y está cubierto por malla sombra o polietileno. Es ideal para la producción de hortalizas y plantas ornamentales.
4. **Microtúnel, túnel bajo o mini invernadero:** Estructura pequeña y construida con arcos sobre los que se adhieren cubiertas de plástico. Disminuye los efectos perjudiciales de las bajas temperaturas en los cultivos.

2.1.4. Estaciones y períodos vegetativos de los cultivos

En México las siembras y cosechas de la actividad agrícola, están relacionadas directamente tanto con las estaciones del año y los periodos vegetativos de los cultivos (SADER, 2016). Permitiendo a los cultivos dividirse en cuatro tipos:

1. **Perenne:** Este define a todos los cultivos de ciclo largo, es decir, su periodo vegetativo se extiende más allá de doce meses y por lo regular una vez establecida la plantación, se obtienen varias cosechas. Ejemplo de ellos son la naranja, el aguacate y el cacao.
2. **Anuales o cíclicos:** Son aquellos cultivos cuyo período vegetativo es menor a 12 meses y requieren de una nueva siembra para la obtención de cosecha. Estos se concentran en dos periodos productivos, primavera/verano y otoño/invierno. Tienen como ventaja la posibilidad de sembrar y planificar la huerta, por lo que se puede cambiar de cultivo cuando se desee. El maíz, trigo y frijol pertenecen a este tipo de cultivo.
3. **Bienal:** Son aquellos cultivos cuyo ciclo productivo se extiende a dos años, es decir, su cosecha tarda dos ciclos. Por ejemplo: La papaya, la piña y la fresa.
4. **Temporal:** La producción de estos cultivos depende del comportamiento de las lluvias y de la capacidad del suelo para captar el agua. Al respecto, tienen la ventaja de que el gasto en la producción es menor al no tener que invertir en el tema de riego. Algunos ejemplos son el maíz de temporal, el limón y el sorgo.

2.1.5. La floricultura en agricultura protegida en México

La floricultura es la parte de la horticultura dedicada al cultivo de flores y plantas ornamentales con usos principalmente decorativos. Es un área del sector agrícola que abarca varias actividades como la producción de plantas para jardín, producción y comercialización de flores de corte, paisajismo, decoración de interiores, por mencionar solo algunas (Baptista *et al.*, 1999).

El uso de invernaderos para el cultivo de flores se inició con el cultivo de tulipán en Países Bajos en el siglo XVII, ya que era la flor más apreciada en la época y la rentabilidad de su cultivo podía permitir el gasto en invernaderos de cristal con estructuras de hierro fundido (Novagric, 2016). Con el paso del tiempo, las instalaciones ya no se cuestionan tanto, las tecnologías en su elaboración incrementan día a día y el cultivo bajo condiciones de invernadero son muchas veces más protegidas que a cielo abierto, lo que brinda al agricultor un mayor aseguramiento de su inversión (García-Suárez, 2020). Los cultivos de flores pueden clasificarse en 2 tipos conforme a su producción: (1) flores de corte y (2) plantas de ornato en maceta, entre los que incluye la producción de árboles de ornato. Ambas actividades son de suma importancia, no solo en el aspecto económico; sino también influye en el desarrollo de núcleos sociales (Tecnoagro, 2010).

La producción de flor de corte, que se realiza bajo condiciones de invernadero, se considera como agricultura protegida. En dicha actividad, se facilita la producción, pues se pueden controlar los diferentes factores ambientales, amortiguando los cambios bruscos de temperatura, los daños a las flores y plantas por diferentes condiciones climáticas. Hoy en día, existen invernaderos sencillos y económicos, que dan la protección a las plantas mediante una cubierta plástica translúcida. Generalmente, este tipo de invernaderos son ligeros, resistentes, económicos y con estructuras no muy voluminosas de fácil construcción, mantenimiento y conservación. La forma de los invernaderos puede adaptarse conforme a la forma del terreno, condiciones climáticas (como la luz solar, temperatura, lluvia, viento) y a la orientación de la estructura (preferentemente hacia el oeste) (Tecnoagro, 2010).

A través de los años, esta actividad se ha convertido en una de las más rentables en el sector agrícola, ya que permite obtener un importante movimiento económico gracias a la demanda que se genera en el mercado tanto nacional como internacional. De acuerdo a datos publicados por la SAGARPA (2018), en México la producción de flores requiere de mucha mano de obra, en este rubro la actividad genera 188 mil empleos directos y 50 mil eventuales dependiendo de la temporada, así como más de un millón de trabajos indirectos anualmente.

2.2. Tecnologías digitales y su uso en agricultura protegida

2.2.1. Cartografía en México

La Cartografía es la ciencia que estudia los distintos sistemas o métodos para representar sobre un plano una parte o la totalidad de la superficie terrestre, de forma que las deformaciones que se producen sean conocidas y se mantengan dentro de ciertos límites o condiciones, que dependen de las características de cada representación (Santamaria-Peña, 2011).

Para involucrar a México en la historia de la cartografía es necesario separar las etapas históricas propuestas por [Contreras-Servín \(1995\)](#), que determinaron la evolución de los mapas y sus características:

1. **Época prehispánica:** Los pueblos indígenas asentados en el actual territorio nacional tuvieron su propia cartografía mucho tiempo antes del descubrimiento del continente de América. Los pocos mapas prehispánicos que se han conservado están comprendidos en los llamados códices.
2. **Época colonial:** Una vez consumada la dominación de los aztecas por Hernán Cortés, este emprendió la marcha hacia el Sur haciendo uso de mapas indígenas, que generalmente corresponden a los planos precortesianos adaptados por los conquistadores, con leyendas aclaratorias en español que sustituyen a los jeroglíficos, conservando el estilo pictórico indígena.
3. **Siglos XIX y XX:** Durante los primeros años del siglo XIX, los trastornos políticos del país impidieron que el gobierno concediera atención al desarrollo cartográfico nacional, por lo que este quedó en manos de esfuerzos particulares, los cuales lograron llevar a cabo importantes trabajos regionales y mantener despierto el interés por esta actividad, sin embargo, la cartografía necesitó apoyo estatal y pronto quedó incluida en el proyecto nacional Porfirista; así, en mayo de 1878, se crea la Comisión Geográfica Exploradora, la cual fue la primera dependencia del gobierno federal encargada de elaborar la cartografía del territorio nacional.

Por último, y demostrando un gran avance para la cartografía en el país, la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) fue creada en 1968 por decreto presidencial con la finalidad de elaborar la moderna cartografía que requería el país, así como para estar al tanto de los avances tecnológicos en el manejo de información geográfica, estadística e informática³. Posteriormente, en el decenio de los ochenta pasó a ser el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), y su propósito fue cubrir el territorio nacional con una cartografía a escala 1:50,000 en los temas de Topografía, Geología, Edafología, uso del suelo, y uso potencial del suelo⁴. Sin embargo, en la actualidad el INEGI trata de proporcionar información a nivel nacional, regional y local, utilizando diferentes escalas, la cuales se presentan en la tabla 2.2.1.

³ver: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007037>

⁴ver: <https://www.inegi.org.mx/programas/topografia/50000/>

Tabla 2.2.1*Escalas numéricas empleadas por INEGI.*

Nivel Nacional	Nivel Regional
1:4,000,000	
1:2,000,000	1:250,000
1:1,000,000	
Nivel Microrregional	Nivel Local
	1:20,000
1:50,000	1:10,000

Nota. Datos del [INEGI, 2021](#).

2.2.2. Sistemas de Información Geográfica

La sociedad de la información ha incorporado en las últimas décadas el componente geográfico de los datos a la vida cotidiana. La cartografía ha dejado de ser un elemento de ámbitos profesionales o científicos, con escasa presencia en la actividad del ciudadano con conocimientos promedio en el tema de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para convertirse en una herramienta de primer orden para el público en general, para las administraciones y empresas en particular. La propia elaboración de la cartografía ha pasado de ser un terreno exclusivo de profesionales y expertos del sector, para convertirse en una tarea abierta gracias a las nuevas tecnologías, que permiten a los usuarios desarrollar y compartir información cartográfica de forma colaborativa ([Varela-García, 2013](#)).

Para [López-Trigal \(2015\)](#) un SIG es un conjunto de herramientas compuestas por hardware, software, datos y usuarios, que permite capturar, almacenar, administrar y analizar información digital, así como realizar gráficos o mapas, y representar datos alfanuméricos. Durante décadas los SIG se han aplicado a problemas de gestión territorial y de recursos naturales, a cuestiones relacionadas con el medio ambiente, la logística militar o en contextos directamente vinculados con las ciencias de la Tierra, como: la geografía, la geología, etc. Además, recientemente se ha empezado a considerar el uso potencial de los SIG para otros campos y disciplinas relativamente inéditos y en particular en la investigación en Ciencias Humanas y Sociales ([Bosque-González et al., 2012](#)).

A pesar de la heterogeneidad de la información geográfica, existen dos aproximaciones básicas para simplificar y modelizar el espacio, de modo que este pueda ser almacenado y manipulado en un sistema informático, dando lugar a dos modelos de datos:

1. **Modelo vectorial:** El modelo de datos vectorial se basa en el supuesto de que la superficie de la Tierra se compone de objetos discretos tales como árboles, ríos, lagunas, etc. (González-González y Pereira-García, 2016). En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas. Para cada entidad geométrica las características son constantes. La forma de estas entidades se codifica de modo explícito, porque modeliza el espacio geográfico a través de una serie de primitivas geometrías que contienen los elementos más destacados de dicho espacio. Estas primitivas son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos (Olaya, 2009)
2. **Modelo ráster:** La estructura de un ráster se basa en una matriz de celdas representadas en filas y columnas, cada celda puede almacenar información de una variable (precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, longitudes de onda del espectro electromagnético, etc.). El modelo ráster no recoge de forma explícita las coordenadas de cada una de las celdas, sino los valores de estas. No resulta necesario acompañar a dichos valores de un emplazamiento espacial concreto, pues hacen referencia a un elemento particular de la malla, la cual representa una estructura fija y regular. Pero es necesario ubicar dicha malla en el espacio para después poder calcular las coordenadas de cada celda (Olaya, 2009).

Finalmente, con base en estos modelos de datos de SIG, se puede realizar un análisis geoespacial; el cual se refiere a la recolección, afinamiento, procesamiento y visualización de datos, historias, dimensiones y sinergias urbanas con un enfoque geográfico y espacial. El SIG es una herramienta utilizada por distintas ciudades alrededor del mundo como instrumento de análisis, gestión y planificación. Esto es desde el uso de un mapa físico donde se discute y analiza información hasta sofisticados SIG que de manera digital muestran diferentes capas de información en tiempo real, así como el uso de percepción remota y otras geotecnologías.

2.2.3. Uso de sensores remotos en los SIG

Pérez-González y García-Rodríguez (2013) resaltan que desde la década de los ochenta del siglo pasado, cuando se lanzaron varios satélites aplicados a estudios de recursos naturales, se ha visto que estos son de gran utilidad para hacer un seguimiento de problemas de degradación y erosión en suelos. En los últimos años, el acceso a imágenes de diferentes sensores caracterizados por altas resoluciones espectrales, espaciales y/o temporales permite analizar estos problemas desde distintos enfoques. De acuerdo con el Instituto Geológico Nacional de España, (IGNE, 2019) la teledetección es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor, genera una serie de datos que son procesados posteriormente para obtener información interpretable de la Tierra.

2.2.4. Tipos de imágenes satélites

Una imagen satelital es una fotografía tomada por un satélite artificial, que muestra la geografía de un territorio específico, ya sea una ciudad, un país o un cuerpo celeste, o también algún espectro determinado de ondas electromagnéticas.

Las imágenes satelitales se dividen en 3 tipos, los cuales son los siguientes:

1. **Imágenes pancromáticas:** Se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia de energía en una amplia parte del espectro electromagnético (tales porciones del espectro reciben el nombre de bandas) y tales datos pancromáticos se representan por medio de imágenes en blanco y negro. Con las imágenes pancromáticas se puede localizar, identificar y medir accidentes superficiales y objetos, principalmente por su apariencia física, es decir por su forma, tamaño y orientación. Además, identifica elementos generados por la acción del hombre como edificios, carreteras, veredas, infraestructura urbana, vehículos, etc. Mediante las imágenes pancromáticas se pueden actualizar la información física de mapas existentes, delimitar zonas entre tierra y agua, cuantificar el crecimiento de desarrollo urbano, generar modelos digitales de elevación de gran exactitud.
2. **Imágenes multiespectrales:** Se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas. Por ejemplo, un conjunto de detectores puede medir energía roja reflejada dentro de la parte visible del espectro, mientras que otro conjunto mide la energía del infrarrojo cercano. Es posible incluso que dos series de detectores midan la energía en dos partes diferentes de la misma longitud de onda. Estos distintos valores de reflectancia se combinan para crear imágenes de color. Los satélites de teledetección multiespectrales de hoy en día miden la reflectancia simultáneamente en un número de bandas distintas que pueden ir de tres a catorce. Gracias a las imágenes multiespectrales se pueden distinguir las rocas superficiales y el suelo por su composición y consolidación, delimitar terrenos pantanosos, estimar la profundidad del agua en zonas litorales, es decir, se alcanza un mayor detalle con las imágenes multiespectrales.
3. **Imágenes hiperespectrales:** Se refieren a un sensor espectral que mide la reflectancia en muchas bandas, con frecuencia de cientos o miles. La teoría en lo que se apoya la teledetección hiperespectral es que la medida de la reflectancia en numerosas franjas estrechas del espectro permite detectar características y diferencias muy sutiles entre los rasgos de la superficie, especialmente en lo que se refiere a vegetación, suelo y rocas. Cabe señalar que las imágenes hiperespectrales se parecen a fotografías.

2.3. Impacto ambiental originado por la agricultura protegida

2.3.1. Impactos ambientales

La SEMARNAT (2018), se define impacto ambiental como la *Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza*. Existen diversos tipos de impactos ambientales que se pueden clasificar, de acuerdo a su origen, como se muestra a continuación:

1. **El aprovechamiento de recursos naturales.** Ya sean renovables, tales como el aprovechamiento forestal o la pesca; o no renovables, tales como la extracción del petróleo o del carbón.
2. **Contaminación.** Todos los proyectos que producen algún residuo (peligroso o no), emiten gases a la atmósfera o vierten líquidos al ambiente.
3. **Ocupación del territorio.** Los proyectos que al ocupar un territorio modifican las condiciones naturales por acciones tales como desmonte, compactación del suelo y otras.

Existen diversas clasificaciones de impactos ambientales de acuerdo a sus atributos. La tabla 2.3.1, presenta una clasificación de impactos ambientales según su impacto y atributo (SEMARNAT, 2018).

Tabla 2.3.1

Clasificación de impactos ambientales.

Impacto	Atributo	Impacto	Atributo
Positivo	En términos del efecto	Residual	El que persiste después de la aplicación de medidas de mitigación.
Negativo	resultante en el ambiente.		
Directo	Si es causado por alguna acción del proyecto o es resultado del efecto	Temporal	Si por un período determinado o es definitivo.
Indirecto	producido por la acción.		
Acumulativo	Es el efecto que resulta de la suma de impactos ocurridos en el pasado o que están ocurriendo en el presente.	Reversible	Dependiendo de la posibilidad de regresar a las condiciones originales.
		Irreversible	
Sinérgico	Se produce cuando el efecto conjunto de impactos supone una incidencia mayor que la suma de los impactos individuales.	Continuo	Dependiendo del período en que se manifieste.
		Periódico	

Uno de los retos en la gestión de cualquier territorio es conciliar la protección del medio ambiente con la necesidad humana de explotar la naturaleza para obtener alimentos. Los objetivos ambientales y agrícolas no siempre coinciden, aunque gran parte de las divergencias puede llegar a complementarse (Machín-Barroso y López-Manzanares-Fernández, 2012). En general, la agricultura en los países desarrollados se ha intensificado en las últimas décadas, incrementándose notablemente la utilización de productos químicos

y mecánicos, lo cual ha conducido al aumento de la productividad, pero también ha provocado impactos ambientales negativos (Viñas-Sumpsí, 1993). A diferencia de las industrias, la agricultura, al ser una actividad de producción de alimentos que trabaja con insumos naturales como son la tierra y el agua, al producir alimentos y al carecer de chimeneas por donde los gases contaminantes son emitidos a la atmósfera, se ha visto libre de ser considerada durante mucho tiempo como una actividad con capacidad de crear impactos o efectos negativos en el medio ambiente. Hoy en día, este concepto de la agricultura ha cambiado enormemente al quedar demostrado que es susceptible de provocar graves daños en el entorno, su potencial dañino es incluso superior a determinados sectores industriales. Mientras no se empleen prácticas correctas durante el uso de fitosanitarios, aplicación de abonos, gestión de residuos, etc., los impactos ambientales que puede ocasionar esta actividad primaria pueden ser altamente significativos (Sinergia, 2017).

Se establece que existe un impacto ambiental cuando alguno de los componentes del medio ambiente sufre una alteración causada por una acción o actividad que puede ser agrícola o de otra naturaleza. Toda la legislación y la normativa de prevención ambiental tienen por objetivo evitar o minimizar las alteraciones desfavorables, así como los impactos ambientales con efectos negativos. De acuerdo con Sinergia (2017), la actividad agrícola y ganadera afecta a determinados ecosistemas naturales en mayor o menor grado. Algunos de los efectos negativos son los siguientes:

1. Disminución de la productividad del suelo.
2. Acumulación de contaminantes.
3. Falta de agua.
4. Aparición de resistencias a los pesticidas en las plagas.
5. Pérdida de especies polinizadores y de hábitats salvajes.
6. Reducción de la diversidad genética por la uniformidad de cultivos.
7. Riesgos potenciales para la salud relacionados con la aparición de residuos, en ocasiones tóxicos, en los alimentos.

En la agricultura protegida se presentan problemas que pueden impactar en el medio ambiente y en la salud pública. Esto se refiere a las grandes cantidades de residuos sólidos y verdes, tales como los plásticos desechados al renovar cubiertas y tuberías de riego, así como los residuos vegetales que pueden ser portadores de microorganismos patógenos, fitopatógenos y los sustratos; además de las grandes cantidades de agua de riego aplicadas a los cultivos (Padilla-Bernal *et al.*, 2018). El uso no regulado de fertilizantes de origen mineral y de plaguicidas en México tienen ventajas que impactan de forma positiva a los agricultores al aumentar sus rendimientos de producción, sin embargo, las desventajas son importantes, directamente

impactan a la salud de los trabajadores agrícolas y a la degradación de los suelos causada por la acumulación de residuos agrícolas y las temperaturas elevadas generadas por la cubierta plástica (Crespo-Stupkova, 2020). Con base en los diferentes problemas ambientales que puede causar la agricultura protegida, en la siguiente sección describimos los posibles tipos de contaminación que puede causar la actividad.

2.3.2. Tipos de contaminación

La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al medio ambiente que causan efectos adversos en el ser humano (Días-Quispe, 2017). La contaminación ambiental es un fenómeno que impacta sobre todo a las áreas urbanas y rurales de nuestro país, y estas afectan directamente en la salud de la población. Desafortunadamente, no se pueden identificar a simple vista, pero son inmediatas y pueden afectar al individuo a largo plazo. Ante esta situación, resulta alarmante que la sociedad no cuente con información sobre cómo protegerse tanto en su vida diaria, o como evitar que los mismos generen contaminación.

Los tipos de contaminación ambiental son fenómenos que afectan a la sociedad y las graves consecuencias que ocasionan a nuestro planeta son incalculables. Por lo anterior, es factible que toda la humanidad tome conciencia sobre la protección y el cuidado del medio ambiente.

En consecuencia, para Días-Quispe (2017), los principales tipos de contaminación son:

1. Contaminación primaria o que impactan a los recursos naturales.

- **Contaminación del suelo:** Es la incorporación de material extraño al suelo, como fertilizantes de origen mineral, plaguicidas y desechos industriales. Altas concentraciones de fertilizantes y plaguicidas en el suelo produce un desequilibrio físico, químico y biológico que afecta negativamente las plantas, animales y humanos.
- **Contaminación del aire:** Es la adición de contaminantes a la atmósfera, como lo son óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV), etc., los cuales son conocidos como gases de efecto invernadero.
- **Contaminación del agua:** Es la presencia de material extraño en el agua, como lo son microorganismos, productos químicos, residuos industriales y aguas residuales, los cuales deterioran la calidad del agua y la hacen no apta para la agricultura.

2. Contaminación secundaria o de percepción.

- **Contaminación térmica:** Se produce debido a la emisión de fluidos a elevada temperatura y es causada por la influencia humana. Se ha demostrado que este aumento artificial de la temperatura es uno de los causantes del actual cambio climático que existe en la actualidad (González-García, 1993).
- **Contaminación visual:** La contaminación visual es cualquier alteración del paisaje natural o artificial cuya percepción afecta negativamente al observador. Es un tipo de contaminación ocasionado por el uso excesivo de diferentes elementos ajenos al ambiente que alteran la estética o imagen de un paisaje, el cual puede ser natural o artificial, afectando las condiciones, la calidad de vida y las funciones vitales de los seres vivos.

2.3.3. La contaminación del suelo en cultivos de agricultura protegida

El término *contaminación del suelo*, se refiere a la presencia en el suelo de un químico o una sustancia fuera de sitio y/o presente en una concentración más alta de lo normal que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado (FAO, 2015). Aunque la mayoría de los contaminantes tienen origen antropogénico, algunos contaminantes pueden ser de origen natural, como los minerales, y pueden ser tóxicos en concentraciones altas. Con frecuencia, la contaminación del suelo no puede ser evaluada directamente o percibida visualmente, convirtiéndola en un peligro oculto (Rodríguez-Eugenio *et al.*, 2019).

De acuerdo con Moya-Talens (2009), la transformación de los cultivos de temporal a cultivos de riego, se pretende la implantación de cultivos más exigentes y más productivos. Los cultivos de riego se les tiene que satisfacer diversas demandas de la composición del suelo (Materia Orgánica, Nutrientes, etc.) y evitar problemas como la salinización y la erosión del suelo. La evolución de la agricultura, de extensiva a intensiva y más aún protegida, ocasiona como problema principal la contaminación del suelo.

Los principales contaminantes del suelo, originados por la agricultura, provienen del uso de fertilizantes con exceso de Nitrógeno (N) y Fósforo (P). El nitrógeno (N) es un componente esencial de todas las estructuras vivas como las proteínas, el ADN, el ARN, las hormonas, las enzimas y las vitaminas. Se presenta tanto en formas orgánicas como inorgánicas y en diferentes estados de oxidación. Las formas no reactivas, como el nitrógeno gaseoso (N_2), pueden ser asimiladas a través de la actividad microbiana. Las plantas necesitan compuestos con mayor disponibilidad química como el ion amonio (NH_4^+) y el ion nitrato (NO_3^-), mientras que los animales requieren formas complejas como los aminoácidos y los ácidos nucleicos (Yaron *et al.*, 2014). El fósforo (P) es uno de los principales macronutrientes para todos los organismos vivos. Forma parte de las moléculas biológicas como el ADN y el ARN, y se usa para transportar energía celular vía el trifosfato de adenosina (ATP). El nitrógeno y el fósforo se convierten en contaminantes cuando son aplicados en exceso a los suelos agrícolas en forma de fertilizantes o en áreas de producción ganadera intensiva (Torrent *et al.*, 2007). Estos nutrientes pueden filtrarse a las aguas subterráneas o ser transportados a los cuerpos de agua

superficiales por la escorrentía, causando eutrofización o llevando a altas concentraciones de nitratos que causan problemas ambientales y de salud humana. Aunque los nutrientes presentes en el suelo son esenciales para la producción de cultivos, cuando son aplicados en exceso pueden tener efectos negativos sobre los rendimientos de las cosechas. El nitrógeno suministrado en grandes cantidades aumenta la producción de clorofila, la energía para el desarrollo de flores y el alargamiento de raíces se reorienta hacia la proliferación del follaje, causando desórdenes en las plantas, haciéndolas más vulnerables a los ataques de patógenos. La contaminación por nitrógeno influye sobre la descomposición de la materia orgánica del suelo, ya que afecta a la composición y las actividades de la comunidad microbiana, (Bragazza *et al.*, 2006) así como a la acidez y salinidad del suelo (Han *et al.*, 2015). La cantidad necesaria de nutrientes en el suelo, depende del tipo de cultivo a establecer y se puede monitorear a partir de un análisis de suelo, para establecer los parámetros óptimos para el cultivo.

2.3.4. Parámetros importantes en el análisis de suelos

El análisis del suelo no solo ayuda para tomar las decisiones importantes, sino también las decisiones correctas con respecto al manejo del cultivo. Existen varios parámetros para realizar un buen análisis del suelo para su uso agrícola y son los siguientes:

1. **pH del suelo:** Mide el grado de acidez de un suelo, es decir, la concentración del ion hidrógeno (H^+) que existe en el suelo. La máxima disponibilidad de la mayoría de los nutrimentos se obtiene cuando el pH del suelo se encuentra cercano a la neutralidad entre 6.0 y 6.5. En general es conveniente que el pH del suelo no sea menor que 6.0, sin embargo, suelos con pH menor que 6.0 sin llegar a 5.5 se consideran moderados a ligeramente ácidos, pero estos suelos no necesariamente requieren de encalado. Por otro lado, suelos con pH entre 6.5 y 7.5 no presentan problemas generales de manejo, a excepción de aquellos que contienen cantidades apreciables de bicarbonato de sodio en la solución del suelo, en cuyo caso pueden presentarse problemas de disponibilidad de hierro. A medida que el pH aumenta se suelen incrementar los problemas de disponibilidad de Zinc (Zn), Hierro (Fe), Cobre (Cu) y Manganeseo (Mn) (Castellanos, 2000).
2. **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la cantidad de sales que contiene un suelo, su resultado se da en milimhos/cm o dS/cm y también en micromhos/cm. Los suelos con elevadas conductividades eléctricas impiden el buen desarrollo de las plantas, ya que contienen asimismo una elevada cantidad de sales. Cada cultivo es capaz de sobrevivir en rangos algo diferentes de conductividad, dependiendo del tipo de sales que tiene el suelo, sin embargo, se pueden dar las siguientes líneas generales: <500 micromhos/cm, buen desarrollo; 500-1000 micromhos/cm, aparecen problemas en algunos cultivos; >1000 micromhos/cm, dificultades en muchos cultivos (Garrido-Valero, 1993).

3. **Salinidad del suelo:** La presencia de las sales afecta la asimilación de nutrientes por las plantas y la actividad microbiana del suelo. La salinidad tiende también afectar otros tipos de suelos, pero en menor medida y puede llevar al reconocimiento de fases salinas cuyas también merecen llamar la atención cuando se encuentran bajo cultivos sensibles por la salinidad, el elemento con mayor presencia en la mayor parte de los suelos es el Sodio (Na), pero un exceso en su concentración puede actuar como un factor limitante para el rendimiento de las plantas (FAO, 2022).

2.3.5. Niveles nutrimentales de los suelos

En palabras de Castellanos (2000) la materia orgánica (MO), es una fuente de nutrimentos como lo son: el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Azufre (S) y los ácidos húmicos y fúlvicos. La MO actúa como agente quelante de nutrimentos como Hierro (Fe) y Manganeseo (Mg).

Aunque se han identificado 20 elementos químicos en la mayor parte de las plantas, se ha visto que solo 16 son realmente necesarios para un adecuado crecimiento y una completa maduración de las plantas. A estos 16 elementos se les considera como los nutrientes esenciales. Carbono (C), Oxígeno (O), e Hidrógeno (H), constituyen la mayor parte del peso seco de las plantas, estos elementos provienen del dióxido de carbono (CO₂) atmosférico y del agua (H₂O). Les siguen en importancia cuantitativa el Nitrógeno (N), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Fósforo (P) y Azufre (S) que son absorbidos del suelo (Infoagro, 2017).

Un suelo fértil es el que tiene buena cantidad de nutrientes para las plantas, existen dos tipos de nutrientes: los *macronutrientes* y los *micronutrientes*. Los *macronutrientes* deben estar presentes en el suelo en mayores cantidades para ser aprovechado por los cultivos, su presencia es indispensable para el crecimiento y fructificación de las plantas. Los principales *macronutrientes* son el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio K, Magnesio (Mg) (FAO, 2013). Los *micronutrientes* se denominan así debidos a sus cantidades tan pequeñas en que se consumen por los cultivos, a pesar de ello, son tan importantes como los *macronutrientes* para mantener el potencial productivo del suelo. En esta categoría quedan incluidos el Hierro (Fe), Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Cobre (Cu), Boro (B) y Molibdeno (Mo) (Castellanos, 2000).

2.4. Caracterización del Crisantemo

2.4.1. Origen

El crisantemo tiene su origen en el continente de Asia, en China es empleado como flor ornamental desde hace más de dos mil años y en Japón se considera una flor santa siendo un símbolo de larga vida y en la actualidad la flor de Crisantemo está presente en la bandera nacional de Japón. A partir de ahí se introdujo a Europa y posteriormente hacia el Occidente (Rimache-Mijail, 2011).

2.4.2. Taxonomía

El Crisantemo presenta la siguiente clasificación taxonómica⁵:

- Reino: Plantae
- Phylum: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsida
- Orden: Asterales
- Familia: Asteraceae
- Género: *Chrysanthemum*
- Especie: *Chrysanthemum coronarium* L.

2.4.3. Fonología

La fonología de una planta se describe como los cambios que se producen desde su nacimiento hasta su madurez y están influenciados por las condiciones ambientales. En las plantas con flores, suceden varios eventos reproductivos que siguen un patrón estacional como: el comienzo de la floración, la fructificación y la dispersión de la semilla (Shivanna y Tandon, 2014).

2.4.4. Estados Fenológicos del Crisantemo

Para Villares-Guayasamín (2018), el crisantemo presenta siete etapas fenológicas, desde el trasplante hasta la madurez comercial (Ver Figura 2.4.1).

(A) Vegetativa I

En la fase vegetativa se distinguen dos estados fenológicos que están relacionados con los requerimientos de luz artificial. El estado vegetativo I comprende el periodo entre el trasplante y el corte de luz artificial. El grupo de anastacias la luz es suministrada por 21 días y el grupo de estándares recibe luz por 32 días.

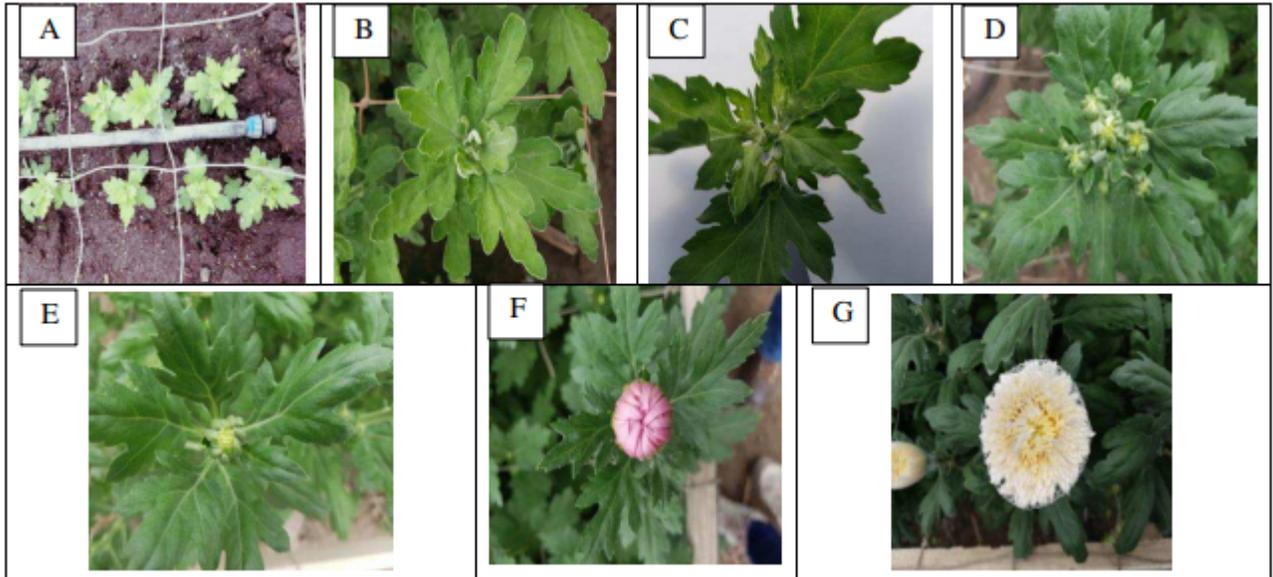
(B) Vegetativa II

La etapa vegetativa inicia desde el día en que se elimina la luz artificial hasta el apareamiento del

⁵Tomada de Cal-IPC (2006)

Figura 2.4.1

Estados fenológicos de *Chrysanthemum* sp. (A) Vegetativo I (luz), (B) Vegetativo II (sin luz), (C) Botón arroz, (D) Botón arveja, (E) Botón garbanzo, (F) Mostrando color, (G) Cosecha.



Fuente: Tomada de la referencia (Villares-Guayasamín, 2018).

botón. En anastacias dura 22 días y en estándares 24 días. En esta etapa se elimina el suplemento de luz artificial.

(C) Botón arroz

La iniciación floral se evidencia con el apareamiento del botón arroz, lo que explica que ha iniciado la etapa reproductiva del crisantemo. Esta fase se caracteriza porque en la zona apical de la planta se observa un pequeño botón floral que asemeja al tamaño de un grano de arroz, de ahí viene su nombre. Para Villares-Guayasamín (2018), esta característica se observa a los 42 días del trasplante en anastacias y 56 días en estándares.

(D) Botón arveja

En este estado fenológico el botón se muestra más ensanchado y adquiere una forma más redondeada, su tamaño se parece a una arveja con coloración verdosa y se observa la presencia de algunos botones florales por planta. Este acontecimiento se registra a los 50 y 65 días después de la siembra en anastacias y estándares, respectivamente.

(E) Botón garbanzo

El estado de botón garbanzo se desarrolla a partir de los 55 días después del trasplante en anastacias y 70 días en estándares. Este se caracteriza por ser un botón bastante ensanchado, con una coloración

verde oscura en la periferia y amarilla verdosa mientras más se acerca al centro. A medida que avanza este estadio, el botón aumenta de diámetro y la coloración amarilla tiende a crecer hacia los extremos.

- (F) Mostrando color A partir de los 60 y 75 días después de la siembra, tanto en Anastasias y Estándares, se observa los primeros pétalos que indican el color característico de la variedad. Conforme avance esta etapa, aumenta la longitud de las lígulas florales y crece el diámetro de la inflorescencia. También se intensifica la coloración.
- (G) Cosecha: En esta fase la inflorescencia llega a su máximo desarrollo, conllevando a la cosecha comercial. Se realiza a los 80 días después de la siembra en anastasias y 91 días después de la siembra en estándares.

Capítulo III
METODOLOGÍA

En este capítulo, se describe la metodología usada para el presente trabajo de tesis. Con la finalidad de que se comprenda la forma en que se obtendrán los resultados de la investigación realizada en torno a la agricultura protegida en el municipio de San Salvador el Verde, se divide en tres secciones.

3.1. Análisis de los factores que propician el crecimiento de la agricultura protegida

3.1.1. Factores socioeconómicos

El primer proceso para realizar el análisis de los factores determinantes socioeconómicos que han impulsado el crecimiento de la agricultura protegida, fue la realización de una búsqueda sistemática de los componentes de la calidad de vida de los pobladores del área de interés. Se realizó a través del portal de INEGI⁶, en donde los principales componentes relacionados con la calidad de vida que se analizaron se encuentran la estratificación socioeconómica de la población (clasificándolos en grupos de individuos de acuerdo a su nivel socioeconómico), el número de perceptores de ingresos, la educación, la pobreza. Por otro lado, se realizó una búsqueda en las plataformas digitales (SIAP⁷ y SADER⁸) la información agrícola referente a la agricultura protegida como el número y tipo de instalaciones, estadísticas a final de los periodos agrícolas, apoyos gubernamentales para impulsar la agricultura comercial y de autoconsumo⁹ y eventos culturales donde se comercializa productos derivados de la floricultura producidos en agricultura protegida.

3.1.2. Factores edafoclimáticos

El conocimiento de condiciones edafoclimáticas es clave para el éxito del desarrollo de toda actividad agrícola. Para ello, se documentó la información en bases de datos y mapas edafológicos del municipio de San Salvador el Verde en el geoportal CANABIO¹⁰. La información consultada es referente al tipo de suelo, clima, régimen de humedad. La información extraída de este portal se analizó, categorizo y representó en mapas para facilitar la interpretación de resultados e identificar los factores edafoclimáticos que influyen en el desarrollo del crecimiento de la agricultura protegida.

⁶<https://www.inegi.org.mx/>

⁷<https://www.gob.mx/siap>

⁸<https://www.agricultura.gob.mx/datos-abiertos/sader>

⁹Agricultura de Traspatio

¹⁰<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

3.2. Análisis de imágenes satelitales en instalaciones destinadas a la agricultura protegida

3.2.1. Plataformas digitales

Para la determinación del crecimiento de la agricultura protegida, se hace uso de la metodología basada en la recolección de datos mediante la observación de imágenes satelitales RapidEye¹¹ de alta resolución. El objetivo es identificar y trazar polígonos sobre las estructuras destinadas a la agricultura protegida como invernaderos ubicados geoespacialmente en San Salvador el Verde. En la plataforma de visualización para datos geoespaciales Google Earth Pro¹² se explora y analiza la misma información de los años 2010, 2015 y 2020. La información del año 2022 se tomó del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) Earth Explorer¹³ a través de imágenes Landsat 8¹⁴.

El procesamiento de las imágenes satelitales del USGS, se realizó con el software QGIS (QGIS, 2009). Al igual que Google Earth Pro, el procedimiento de imágenes en QGIS, en lo que se refiere al trazado de polígonos sobre los invernaderos, es similar, la diferencia radica en la exportación de los datos en el formato KMZ para su compatibilidad con Google Earth Pro.

La identificación de los cultivos por especie de los invernaderos trazados de los años 2010, 2015, 2020 y 2022, se realizó a través del mapa digital de México tomado de la plataforma del INEGI¹⁵. Este procedimiento se concentra en monitorear el crecimiento de la agricultura protegida destinada a la floricultura en San Salvador el Verde para los periodos mencionados. La determinación de los cultivos por especie en los polígonos de invernaderos trazados es a través del filtro de búsqueda por actividad. Los cultivos de rosa, crisantemo y jitomate son los que se identificaron con un mayor número de instalaciones en agricultura protegida.

3.2.2. Evolución de la agricultura protegida

Para describir la evolución de la agricultura protegida en San Salvador el Verde, se utilizó la tasa de cambio, también conocida como tasa de variación, es el cambio en porcentaje de una variable entre dos momentos distintos del tiempo (Palacio-Prieto, 2004) y se calcula con la siguiente ecuación 3.1:

¹¹El conjunto de imágenes de satélite RapidEye tiene cinco bandas espectrales que van desde 400 a 850 nm. Su resolución espacial fue de 5 CE 5 m.

¹²<https://www.google.com.mx/earth/>

¹³<https://earthexplorer.usgs.gov/>

¹⁴Las imágenes de satélite Landsat 8 proporciona datos con una resolución espacial mínima de 30 metros

¹⁵<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>

$$TC_{i-f} = \left[\left(\frac{SPF}{SPI} \right)^{\frac{1}{p}} - 1 \right] * 100, \quad (3.1)$$

en donde TC_{i-f} es la tasa de cambio porcentual anual, SPF y SPI se refiere a la superficie final e inicial en (ha), respectivamente. Finalmente, p es el período o intervalo de tiempo en el cual se hace la comparación.

3.3. Evaluación de la contaminación del suelo en cultivos de agricultura protegida

La evaluación del impacto ambiental en el suelo a causa del desarrollo de la agricultura protegida se determinó mediante un análisis de suelo en un invernadero de Crisantemo¹⁶ de la Familia Castillo en San Salvador el Verde. Los parámetros a monitorear son el pH, Conductividad Eléctrica, Salinidad, Nitratos (NO_3), Calcio (Ca^{2+}) y Potasio (+) en el cultivo mencionado. Las mediciones se realizaron con un Kit de Monitoreo Nutricional – KitProain +, en el laboratorio de Físicoquímica Orgánica Teórica del Cuerpo Académico ITSSMT-CA-7-Ciencias Básicas de la División de Ingeniería Ambiental del TecNM campus ITSSMT.

3.3.1. Muestreo de suelo

Los procedimientos estándar usados en la toma de muestras de suelos son descritos en la guía escrita por Castellanos (2000). A nivel de campo se consideraron áreas homogéneas, las cuales corresponden a los estados fenológicos (Ver Sección 2.4.4) encontradas en el invernadero en la fecha¹⁷ de la toma de muestra. En cada área homogénea se consideran 14 submuestras de suelo, a una profundidad máxima de 30 cm, con la finalidad de que la muestra sea representativa de cada área. Con el mismo procedimiento y con fines de comparación, se tomaron muestras del cultivo de Astroemelia con riego y del cultivo de Cempasúchil sin riego, ambos cultivos en condiciones de agricultura a cielo abierto.

Los parámetros se midieron en muestras de 50 (g) de suelo diluidas en 100 (mL) de agua destilada, dejando reposar durante 30 (min). La evidencia fotográfica del análisis de resultados se presenta él en anexo A.1. Los valores obtenidos se comparan con los valores óptimos reportados para el cultivo de Crisantemo. La finalidad es identificar posibles impactos ambientales al suelo causados por el desarrollo de la agricultura protegida.

¹⁶Localización: <https://goo.gl/maps/ebT424kR9NFSjwkm9>

¹⁷29 de octubre del 2022

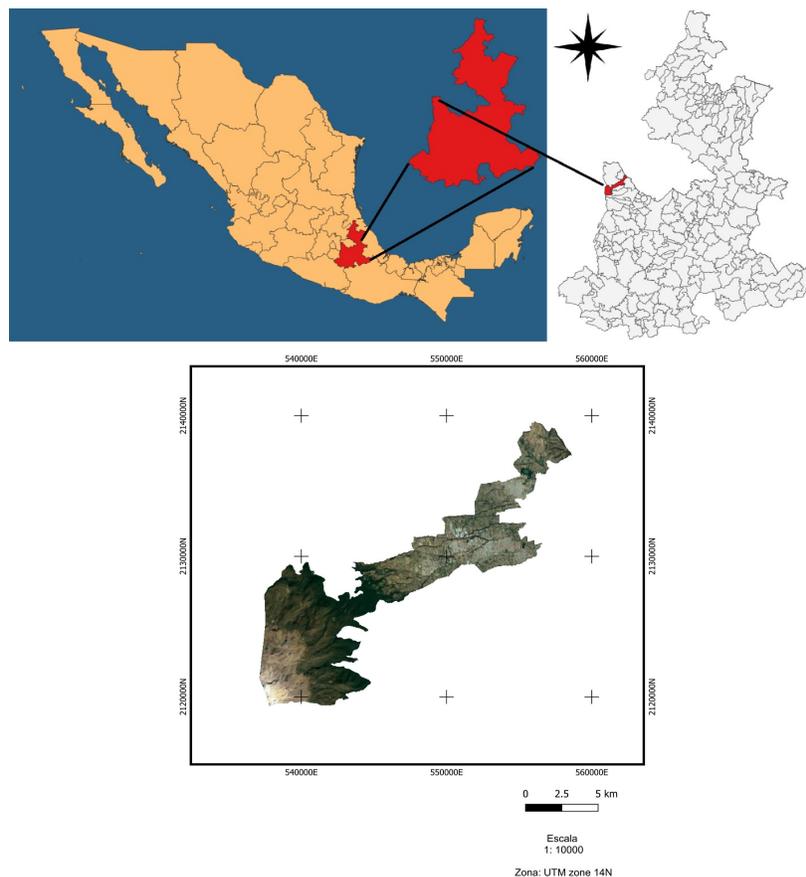
Capítulo IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, los cuales corresponden a tres enfoques de la investigación. Sin embargo, para poner en contexto al lector antes de iniciar con los resultados presentamos aspectos básicos de la zona de estudio.

San Salvador el Verde, se localiza en la parte centro Oeste, del estado de Puebla (ID de Estado #21). Sus coordenadas geográficas son los paralelos $19^{\circ} 12' 18''$ y $19^{\circ} 21' 54''$ de latitud norte y los meridianos $98^{\circ} 26' 54''$ y $98^{\circ} 93' 18''$ de longitud occidental. El municipio colinda al Norte con los municipios de Tlahuapan y San Matías Tlalancaleca, al oriente con el municipio de Huejotzingo, al Sur con el municipio de San Felipe Teotlalingo, al Este con el municipio de San Martín Texmelucan y al poniente con el estado de México y el volcán Iztaccíhuatl (ver Figura 4.0.1). Este municipio cuenta con 108,7 km² de superficie total, así mismo, este municipio se compone por 6 juntas auxiliares, las cuales son Analco de Ponciano Arriaga (Santa Cruz Analco), San Andrés Hueyacatitla, San Gregorio Aztotoacan, San Lucas el Grande, San Salvador el Verde y San Simón Atzitzintla.

Figura 4.0.1

Localización del municipio de San Salvador el Verde en el estado de Puebla, México.



4.1. Factores determinantes en el desarrollo de la agricultura protegida

Los factores determinantes para el crecimiento de la agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla, se pueden clasificar en socioeconómicos (precio de los materiales y apoyo gubernamental) y los dependientes de los recursos naturales (edafoclimáticos¹⁸ y el régimen de humedad).

4.1.1. Factores socioeconómicos

El nivel socioeconómico de una persona representa su situación actual en términos de su educación, trabajo e ingresos, que en conjunto le dan oportunidad de adquirir una mejor calidad de vida (González-García, 1993). Motivo por el cual, se demuestra el interés de cada persona por lograr sus metas y puede medirse directamente a través de indicadores socioeconómicos como el tamaño de la población, vivienda, pobreza y números de perceptores de ingresos. En la tabla 4.1.1 se presenta en número de personas asociadas a cada indicador socioeconómico. Los resultados del censo del INEGI 2020, muestran que 5182 personas cuentan con rezago educativo, lo que indica que ese número de personas con edad mayor a 15 años no saben leer y escribir o que concluyeron la primaria o la secundaria (Barboza, 2005). En el municipio de San Salvador el Verde, 23524 personas se encuentran en situación de pobreza y 24632 personas son perceptores de ingresos para su familia.

Tabla 4.1.1

Estratificación socioeconómica de la población de San Salvador el Verde.

Indicador	En el Municipio
Población ^a	34880
Viviendas (Servicios básicos)	4600
Población en situación de Pobreza ^a	23524
Número de perceptores de ingresos ^a	24632
Rezago educativo ^a	5182
Accesos a servicios de salud ^a	11796

^aNúmero de personas

Nota. Datos tomados del [Censo INEGI 2020](#).

A pesar de que en los años 1910 a 1990 fue donde la agricultura en México y el rezago educativo coexistieron. Barboza (2005) plantea la idea de que un porcentaje mayor del rezago educativo origina como resultado un incremento de la mano de obra dedicada a la agricultura. Es importante mencionar que el

¹⁸Tipo de suelo, clima, régimen de humedad

deseo de cada persona por mejorar sus condiciones económicas, es uno de los factores que los llevó a considerar a la agricultura protegida como un negocio rentable.

Es por ello que los recursos económicos disponibles de los agricultores para sustentar gastos de construcción de estructuras destinados a agricultura protegida son altos. En la tabla 4.1.2 se presenta una comparación de características y costos por m² de invernadero en México para el mes de septiembre del año 2021. Se pueden visualizar los diferentes costos, dependiendo del tiempo de vida útil, la cual depende de la calidad de los materiales usados en su construcción, además de que los precios están sujetos a tipo de cambio del precio del dólar. Se destaca que en el mercado existen diferentes proveedores y constructoras de instalaciones de agricultura protegida, los datos que mostramos en la tabla 4.1.2 son de la empresa Agrofacto¹⁹. Los datos que presentan son para un invernadero por ser el tipo de estructura más factible para la floricultura. Los cultivos de importancia en este trabajo de tesis son los cultivos de la Rosa (*Rosa spp*) y Crisantemo (*Chrysanthemum spp*).

Tabla 4.1.2

Comparación de características y costos por m² de invernadero en México.

Característica	Básico	Reforzado
Vida útil	15 años	30 años
Cantidad de acero	4 - 5 kg/m ²	7 - 8 kg/m ²
Capacidad de carga	20 - 25 kg/m ²	40 - 45 kg/m ²
Altura a canaleta	4.0 - 4.5 m	5 - 6 m
Galvanizado	G90 (275 g/m ² de Zn)	Sendzimir 450 (360 g de Zn/m ²)
Unión entre perfiles	Electrosoldadura	Tornillería
Plástico	Cal 720	Cal 800
Ventilación	Cenital Sencilla	Doble (mariposa)
Accionamiento de ventilaciones	Manual	Motorizado / automatizado
Superficie mínima de construcción	1000 m ²	3000 m ²
Costo aproximado del invernadero*	\$450 - 500 /m ²	\$690 - 800 / m ²

Nota. *Costo aproximado para una superficie igual o superior a 10,000 m² y según precios y tipo de cambio vigentes durante septiembre del 2021. Fuente: <https://agrofacto.com/>.

Por otro lado, es de recalcar que el desarrollo de la agricultura protegida en México ha tenido un crecimiento exponencial (*Imagen-Agropecuaria, 2012*) y en el municipio de San Salvador el Verde no ha sido la excepción (ver Sección 4.2.7) a pesar del incremento de los costos de los invernaderos en los últimos años. El

¹⁹<https://agrofacto.com/>

fenómeno es atribuido en primera instancia a la inversión de los agricultores debido a la rentabilidad de la floricultura en agricultura protegida. Un segundo factor de influencia es la puesta en marcha de diferentes programas por parte del gobierno estatal a través de la Secretaría de Desarrollo Rural. Particularmente, en el periodo que comprende los años de 1999 a 2011, se han otorgado créditos y apoyos completos²⁰ para la adquisición de estructuras destinadas a la agricultura protegida comercial y de traspatio.

Es de destacar que en el sexenio (1999 - 2005) de Melquiades Morales como gobernador de Puebla se promovieron más de 5000 microinvernaderos²¹ y en el sexenio (2005-2011) de Mario Marín Torres se instalaron 17000 microinvernaderos a través del programa de seguridad alimentaria (Jiménez-Merino, 2010). Para el año 2014 (en el sexenio 2011 - 2017 de Rafael Moreno Valle), Puebla obtuvo una derrama económica de 863 millones de pesos con la producción de flores de ornato, produciendo seis millones de toneladas²². Un total de 9,850 familias se dedican a la producción de flores en, 4921 (ha) distribuidas en 39 municipios, entre ellos San Salvador el Verde, de las cuales 1770 (ha) están situadas a cielo abierto y el resto en invernaderos (3,151 (ha)). Se destaca que las rosas de corte, gladiola sin hoja y las orquídeas, son variedades de flores poblanas que se destinan a la exportación, el resto de la producción estatal se comercializa en los mercados locales y en las centrales de abasto de la Ciudad de México y en los tianguis de Huixcolotla y en los estados de Veracruz, Campeche, Tabasco y Chiapas. La demanda de flores se dispara en los festejos con motivo del día de San Valentín, del día de las Madres y el día del Maestro y ferias patronales, lo que muestra que el aspecto Socicultural es muy importante y dispara la demanda de los productos derivados de la floricultura. Los logros de la floricultura en Puebla, sin duda, son debidos a la continuidad de los programas gobiernos anteriores como el de acceso al microcrédito y de agricultura por contrato, pero sin lugar a duda a reinversión de cada una de las personas que se dedican a la actividad de la agricultura protegida.

4.1.2. Factores edafoclimáticos

El éxito de la agricultura protegida en cualquier sitio depende de la combinación de factores climáticos como: el tipo de suelo, clima y régimen de humedad. Una consideración importante es la ubicación del invernadero, donde se toma en cuenta la velocidad, la dirección del viento y la orientación del sol para la captación de la luz solar de manera eficiente.

A continuación se presenta un análisis de los factores de edafoclimáticos en el municipio de San Salvador el Verde, los cuales fueron obtenidos a través de la elaboración de mapas digitales con información de los portales Google Earth y USGS Earth Explore usando la herramienta QGIS (Ver sección 3.2).

²⁰ Apoyos a fondo perdido.

²¹ Superficie 30 m²

²² <https://www.eleconomista.com.mx/estados/Puebla-principal-productor-de-flores-de-ornato-20140507-0049.html>

Tipo de suelo

El suelo es el medio del cual las plantas obtienen los nutrientes que requieren para su desarrollo. El conocimiento que se tenga de las características morfológicas, físicas y químicas del suelo es de gran importancia para planear su uso racional y maximizar su potencial agrícola (INEGI, 2016b). Los suelos evolucionan y dependiendo del medio físico en el que se encuentran ubicados, poseen una serie de características que los hacen fértiles desde el punto de vista agrícola. Asimismo, el suelo tiene algunas propiedades físicas que permiten un mejor o peor drenaje interno; este aspecto es necesario conocerlo al decidir el tipo de prácticas que habrán de llevarse a cabo, si se quiere aprovechar este elemento de manera racional. El total conocimiento del suelo te permite elegir el tipo cultivo a implementar, es por ello que para los propósitos de la investigación de los factores determinantes para el desarrollo de la agricultura protegida, en la figura 4.1.1 se presenta el mapa de los tipos de suelos presentes en el municipio de San Salvador el Verde. La clasificación es de acuerdo con el sistema FAO/UNESCO (1970) modificado por la Dirección General de geografía²³, en donde la mayor parte de la superficie está constituida por el tipo de suelo Leptosol con el 46 %, Phaeozems con el 20 %, Cambisol con el 13 % y Arenosol con el 10 % y en menor proporción como Andosol son el 7 % y Durisol con el 2 %. Es importante mencionar, que en los tipos de suelos Cambisol, Phaeozems y Arenosol se ubican el mayor número de invernaderos. La información anterior se corrobora en la sección 4.2.1.

Clima

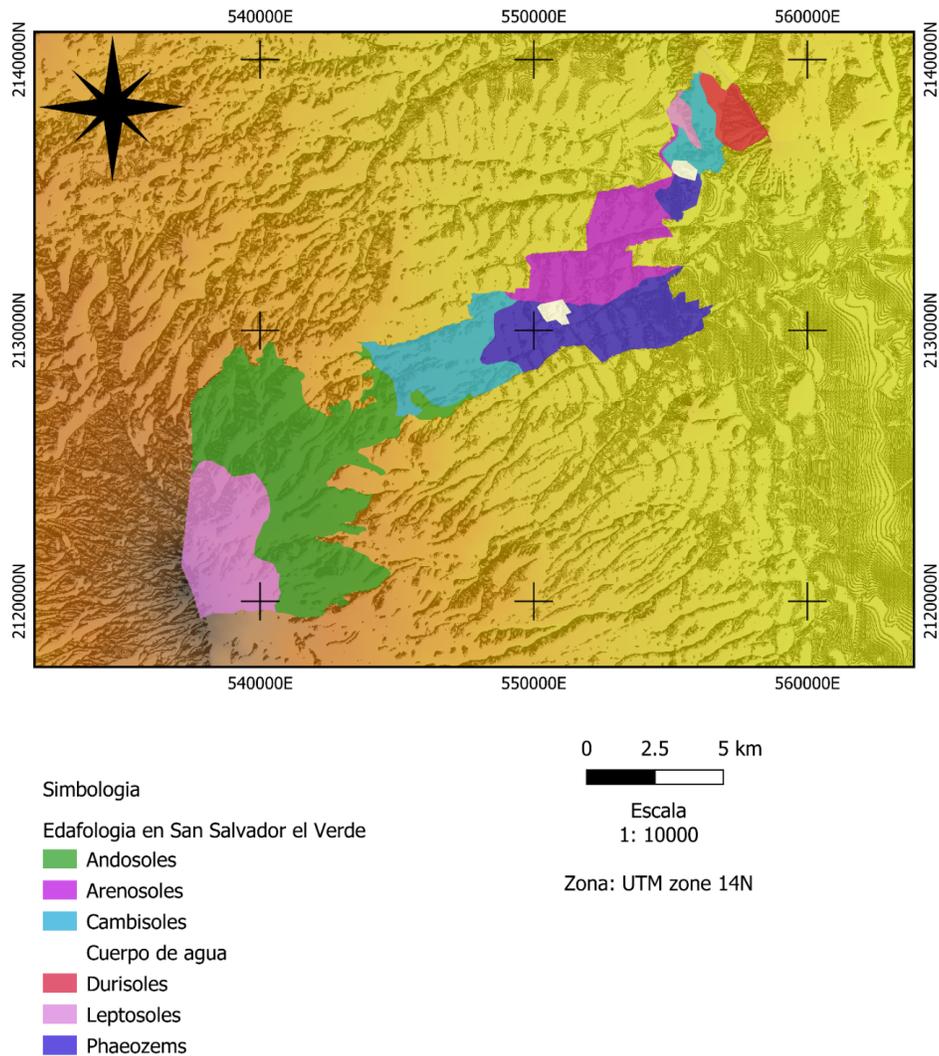
El clima es un elemento natural, no susceptible de ser modificado por el hombre, es importante conocer su comportamiento a partir de datos estadísticos. Las actividades (en este caso agrícolas) deben adaptarse al clima que se presenta en el lugar donde se desea implementar la actividad. En el sector agrícola el conocimiento del clima, te permite saber que cultivos pueden estar bajo condiciones iguales de temperatura, humedad. Este conocimiento te permite planificar actividades extras como la selección del cultivo a implementar y el ciclo de riego requerido por el cultivo con base en el tipo de suelo y clima de la zona donde se establecerá (INEGI, 2016a).

En la figura 4.1.2 se presenta el mapa de climas del municipio de San Salvador el Verde. La distribución de los diferentes tipos de clima en la el territorio es, de la siguiente manera, Frío 8.6 %, Semifrío 41.5 %, Templado C(w1) 11.7 % y Templado C(w2) 38.2 %. Se destaca que un número importante de instalaciones de invernaderos se instalaron en zonas con clima Templado C(w2) y parte contigua del clima Semifrío, subhúmedo. La información se corrobora en la sección 4.2.1.

²³https://sc.inegi.org.mx/repositorioNormateca/MP2_30Ene23.pdf

Figura 4.1.1

Tipos de suelos en el municipio de San Salvador el Verde.



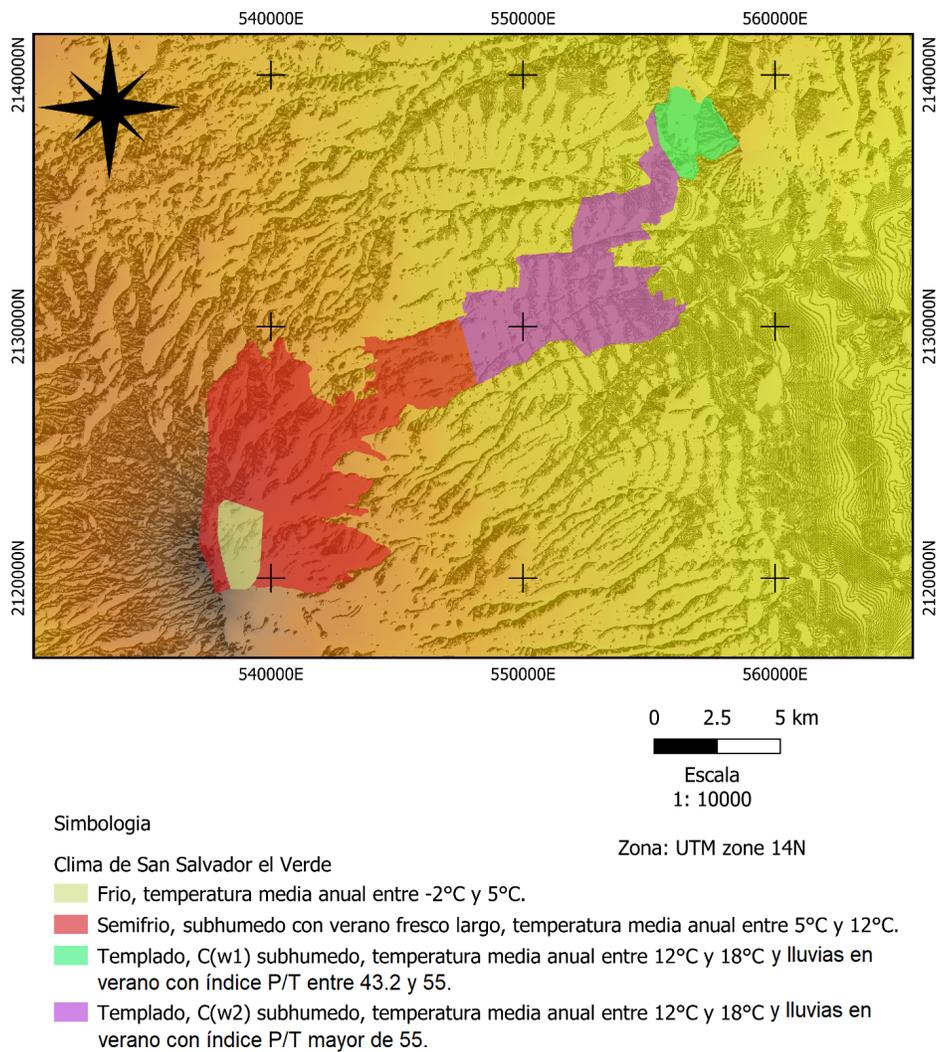
Régimen de humedad

La humedad del suelo es el principal recurso natural de agua para la agricultura y la vegetación (Heim, 2002). El régimen de humedad del suelo determina funciones y características importantes del suelo. En la figura 4.1.3 se muestra el régimen de humedad presente en el municipio de San Salvador El Verde. El régimen de humedad Acuico se presenta en el 20.4% del territorio del municipio, el régimen Udico se establece en el 35.9% y el Ustico abarca el 43.7% del territorio. En los regímenes de humedad Udico y Ustico, se establecen la mayoría de las estructuras destinadas a la agricultura protegida²⁴, y a pesar de que en ellos los niveles de humedad son altos (180 a 330 días de humedad), se puede complementar con sistemas de riego de agua de pozos profundos ubicados en las zonas de los regímenes de interés.

²⁴Ver Sección 4.2.1

Figura 4.1.2

Tipos de clima en el municipio de San Salvador el Verde.

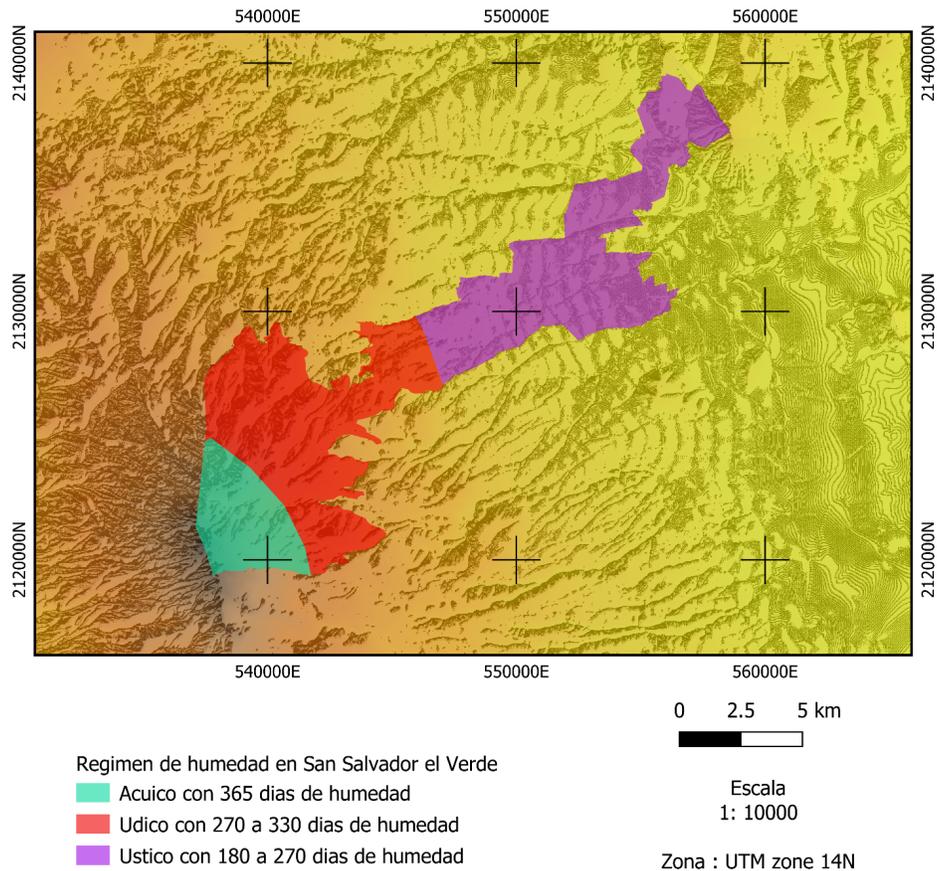


4.2. Determinación del crecimiento de la agricultura protegida a partir de imágenes satelitales

En esta segunda sección, se presentan los resultados de análisis del crecimiento de la agricultura protegida, con base en la elaboración de mapas digitales con información de los portales Google Earth y USGS Earth Explore usando la herramienta QGIS (Ver sección 3.2).

Figura 4.1.3

Régimen de humedad en el municipio de San Salvador el Verde.



4.2.1. Identificación de estructuras destinadas a la agricultura protegida

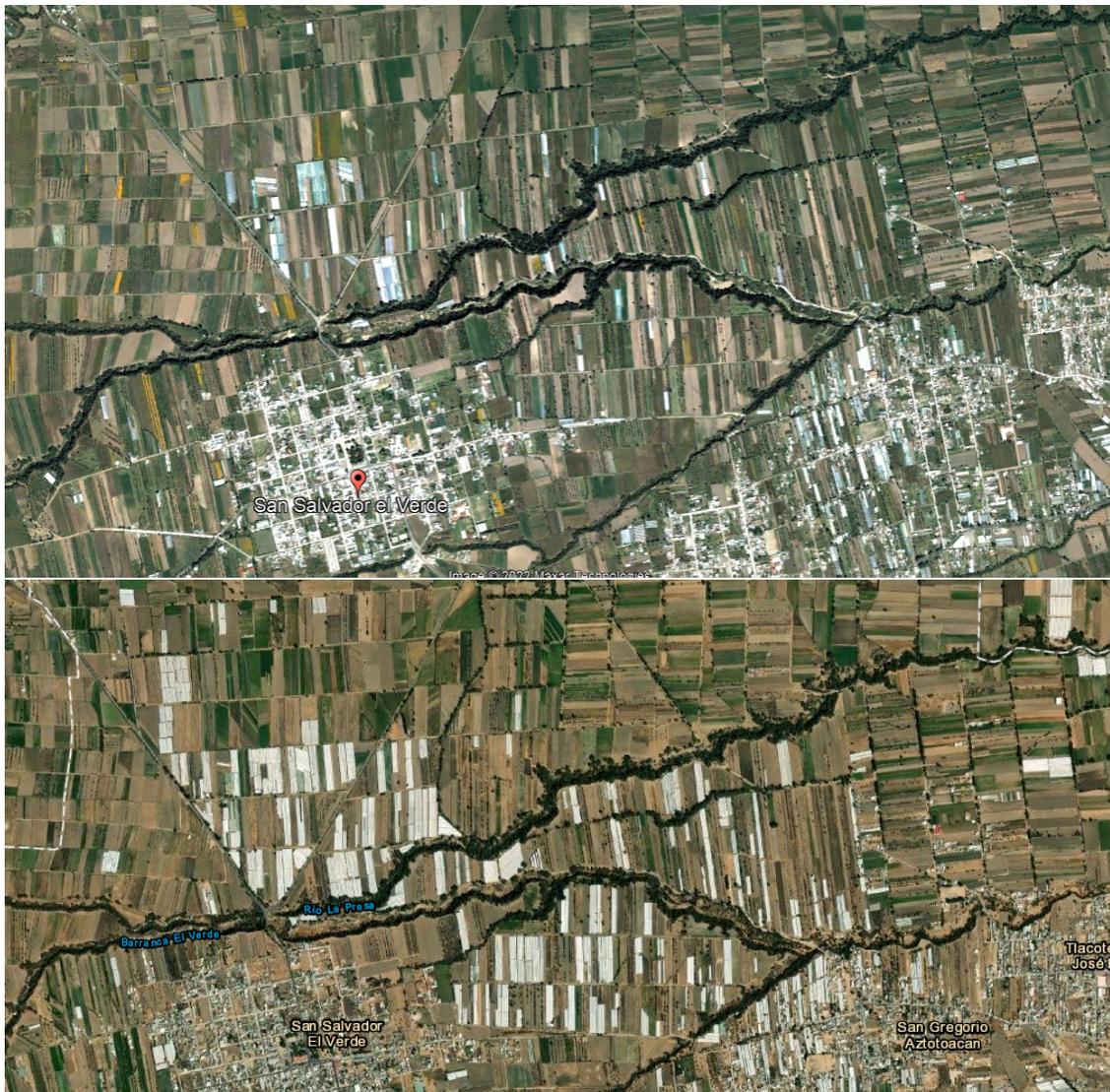
Los mapas son herramientas digitales necesarias para describir y analizar de forma espacial los fenómenos sociales, económicos y ambientales de las zonas urbanas y rurales. Esto es importante en ciudades extensas y diversas como el sitio objeto del estudio. El análisis geoespacial apoyado en mapas permitirá conocer los fenómenos de cambio de la superficie del suelo de San Salvador el Verde, incluyendo sus distintas juntas auxiliares, también se podrá identificar distintos factores socioeconómicos y edáficos. Esto contribuye a analizar y hacer más accesible grandes cantidades de información para identificar dónde se localizan las instalaciones destinadas a la agricultura protegida, además de conocer los desafíos y oportunidades que pueden tener los productores agrícolas en el municipio de San Salvador el Verde.

El crecimiento demográfico ha impulsado actividades enfocadas al sustento y abastecimiento de este, por lo cual no es de extrañar que haya un cambio significativo en el uso de suelos con este fin. En la figura 4.2.1 se muestra una imagen satelital del área de estudio de mes de mayo de 2010 y del mismo mes en el año

2022, con 12 años de diferencia, se puede observar un cambio significativo, en primera instancia, es notorio el aumento de instalaciones destinadas para la agricultura protegida, ya que en su totalidad son invernaderos construidos en la zona central del municipio.

Figura 4.2.1

Imagen satelital de las instalaciones de invernaderos de San Salvador el Verde, Puebla.



Nota. Arriba (Mayo 2010), Abajo (Mayo 2022)

Las localidades con mayores instalaciones dedicadas a la agricultura protegida son San Salvador el Verde y San Gregorio Aztotoacan, se puede atribuir a que los factores edáficos del municipio benefician aquellas zonas. Los suelos de las diferentes localidades en la zona de estudio están situadas en lugares donde predomina

minan los arenosoles, Cambisoles y Phaeozems. Si bien, el Arenosol no juega a favor para los requerimientos nutricionales de la rosa y crisantemo, los Cambisoles y Phaeozems aportan los macronutrientes primarios esenciales para cualquier planta como lo son el Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Al igual, el clima es favorable debido a que la mayoría de instalaciones se encuentran en zonas templadas subhúmedas con una temperatura media anual entre 12° C y 18° C, provocando que la humedad prevalezca en la mayor parte de año.

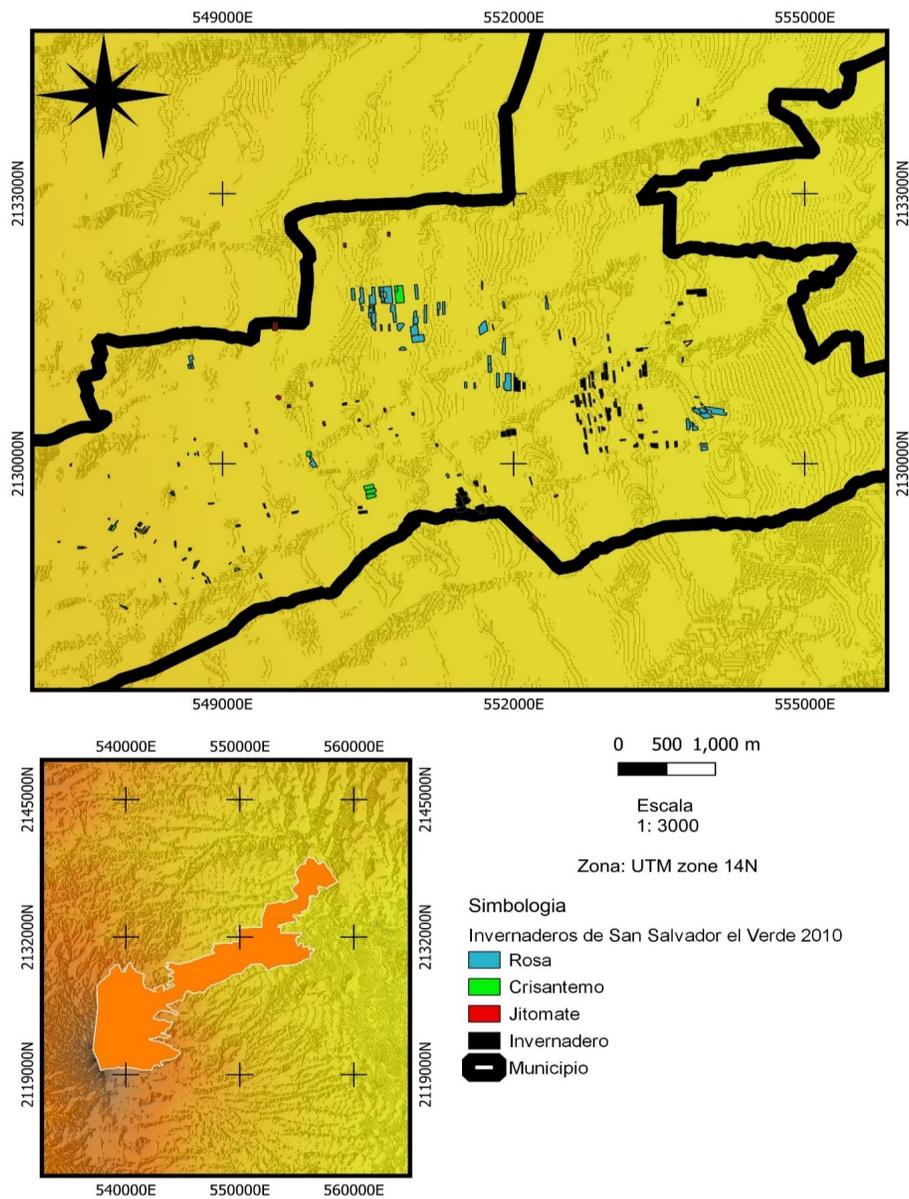
4.2.2. La agricultura protegida en 2010

México cuenta con varias herramientas de gestión encargadas de generar estadística e información geográfica en materia agroalimentaria, gracias a esto se pueden consultar dichas estadísticas para investigación. El SIAP genera estadísticas anuales conforme al cierre de producción agrícola, aportando datos por entidad federativa y municipios, tales como superficie sembrada, cosechada y siniestrada, rendimiento (udm/ha), precio medio rural (\$/udm), producción y valor de diferentes cultivos (SIAP, 2021) Es una herramienta útil que permite analizar a fondo conceptos importantes como ganancias, riesgo de siniestros a los cultivos y viabilidad conforme a su costo de producción a su valor final.

En la figura 4.2.2 se muestra el mapa de invernaderos instalados, elaborado a partir de imágenes satelitales del portal de Google Earth, en donde se pueden observar las zonas con mayor presencia de estructuras destinadas a la agricultura protegida (invernaderos). En el mapa se puede observar una nomenclatura dependiendo el tipo de cultivo, Rosa (color Azul), Crisantemo (Color Verde) y Jitomate (color Rojo).

Figura 4.2.2

Invernaderos en San Salvador el Verde, 2010.



La cuantificación del número de invernaderos destinados a la agricultura protegida se realizó, con base a los datos del SIAP, que corresponden a la superficie cosechada de rosa y crisantemo del año 2010. En la tabla 4.2.1, se presentan los resultados de la producción de agrícola en el municipio de San Salvador el Verde, bajo el concepto de agricultura protegida.

Tabla 4.2.1*Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2010.*

Cultivo	Superficie (ha)		
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada
Rosa	44	44	0
Crisantemo	Sin datos		

Nota. Datos del SIAP, 2010.

Las metodologías empleadas por SIAP se basan en el procesamiento de información estadística de todas las etapas productivas, agropecuarias, hortofrutícolas, ornamentales, acuícolas y pesqueras. Con la finalidad de validar la información presentada en la tabla 4.2.1, con ayuda del mapa de la figura 4.2.2, para identificar las instalaciones destinadas para la agricultura protegida mediante imágenes satelitales consultadas en Google Earth y posteriormente analizadas, mediante el software QGIS, siendo la principal herramienta con el que se calculó la superficie ocupada por dichas instalaciones. Los resultados se presentan en la tabla 4.2.2, los cuales son datos obtenidos por investigación propia. El número de hectáreas destinadas a la agricultura protegida en el año 2010, es de 44 (ha) según datos del SIAP y de 45.67 (ha) con datos propios. La diferencia es del orden de 1,67 (ha), lo que muestra la capacidad de predicción de los SIG, a demás de que se destaca la clasificación del tipo de cultivo como se muestra en la figura 4.2.2 y la tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.2*Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2010.*

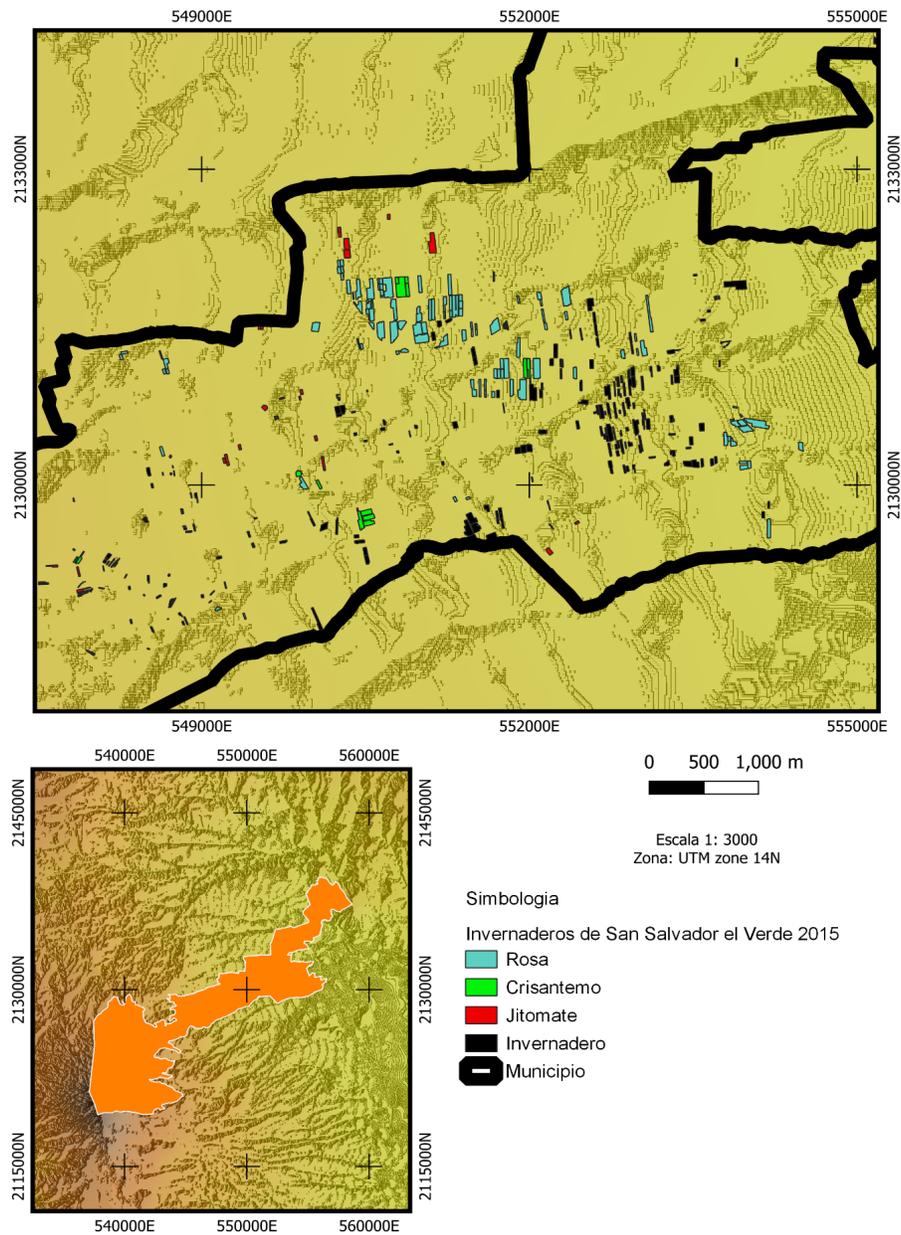
Cultivo	Instalación	Cantidad	Hectáreas (ha)
Rosa		63	20.93
Crisantemo	Invernadero	8	3.56
Jitomate		27	2.02
Desconocido		133	19.16
Total		231	45.67

4.2.3. La agricultura protegida en 2015

La figura 4.2.3 presenta el mapa de invernaderos para el año 2015, elaborada con SIG. A diferencia de la figura 4.2.2, se nota que hay un crecimiento en la superficie destinada a la agricultura protegida, principalmente en la zona central del municipio, en un periodo de cinco años.

Figura 4.2.3

Invernaderos en San Salvador el Verde, 2015.



Los datos del SIAP para el 2015, en materia de agricultura protegida, se presentan en la tabla 4.2.3, es de notar que se reporta, por primera vez, el cultivo de Crisantemo. Se puede interpretar a que los agricultores decidieron experimentar con dichos cultivos para así generar más ganancias en comparación con las generadas a partir del cultivo de Rosa.

Tabla 4.2.3*Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2015.*

Cultivo	Superficie (ha)		
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada
Rosa	53.6	53.6	0
Crisantemo	11	11	0

Nota. Datos del SIAP, 2015.

Realizando un análisis cuantitativo del mapa de invernaderos para el año 2015, presentado en la figura 4.2.3 usando SIG, se ha encontrado una mayor diferencia a la presentada entre el valor reportado por SIAP y nuestra investigación, para el año 2010 es de 1.67 (ha), y para el año 2015 es de 18.78 (ha). En la tabla 4.2.4 se presentan los datos correspondientes al número de invernaderos destinados a la agricultura protegida por tipo de cultivo, cantidad de instalaciones y superficie (ha). Destaca el crecimiento de instalaciones destinadas al cultivo de Rosa de 63 en el año 2010 a 116 para el año 2015. Para Crisantemo el crecimiento en instalaciones es de 8 en el año 2010 a 16 para el año 2015. Tomando la diferencia de los totales de las tablas 4.2.2 y 4.2.4, el crecimiento en la agricultura para el periodo de 2010 a 2015 es de 37.71 (ha). Un análisis más detallado del crecimiento de la Agricultura Protegida, se realizó utilizando una variable llamada *Tasa de Cambio*.

Tabla 4.2.4*Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2015.*

Cultivo	Instalación	Cantidad	Hectáreas (ha)
Rosa		116	38.67
Crisantemo	Invernadero	16	6.11
Jitomate		51	5.60
Desconocido		230	33.00
Total		413	83.38

Tasa de cambio de 2010 a 2015 de la agricultura protegida

La tasa de cambio, presentada en la ecuación 3.1 de la sección 3.2.2, se aplica, directamente, a los datos totales de las tablas 4.2.2 y 4.2.4, para determinar el crecimiento porcentual anual de la agricultura protegida en el periodo de 2010 a 2015.

$$TC_{2010-2015} = \left[\left(\frac{83,38}{45,67} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 \right] * 100 \quad (4.2)$$

$$TC_{2010-2015} = 12,79 \%$$

El porcentaje obtenido es positivo, lo que demuestra que hubo un crecimiento anual en la superficie de agricultura protegida del 12.79 % en un periodo de cinco años.

A partir de los resultados presentados en la sección 4.1.1, referentes al periodo de 2010 a 2015, se pudo identificar una diferencia entre costos relativos de la construcción, mantenimiento y expansión de invernaderos, especialmente porque en dicho período los costos eran un 60 % más accesibles que en la actualidad, razón que se propone como factor determinante de crecimiento de agricultura protegida en el periodo mencionado.

4.2.4. La agricultura protegida en 2020

En la figura 4.2.4 se muestran las ubicaciones de los invernaderos en el año 2020 en la zona de estudio. A diferencia de las figuras 4.2.2 y 4.2.3, el cambio no se visualiza en la zona central del municipio, sino que se enfoca en las juntas auxiliares, principalmente en los patios traseros²⁵ de las viviendas de las localidades.

Los datos del SIAP para el año 2020, muestran un crecimiento de la agricultura protegida, específicamente en el cultivo de Rosa, a diferencia del cultivo de Crisantemo. Los datos se presentan en la tabla 4.2.5, es denotar que para el cultivo de Rosa para el año 2020 la superficie es de 119 (ha) lo que indica un crecimiento de 65.4 (ha) (53.6 (ha) en el año 2015) y para el cultivo de Crisantemo de 14.2 (ha) con un crecimiento de solo 3.2 (ha) en comparación del año 2015 (Ver Tabla 4.2.3). Los resultados se pueden atribuir a que a pesar de que son mayores las ganancias que deja este último cultivo, puede ser más delicado su siembra y cosecha, razón por la cual los agricultores no se arriesgan por la práctica del cultivo del Crisantemo.

Tabla 4.2.5

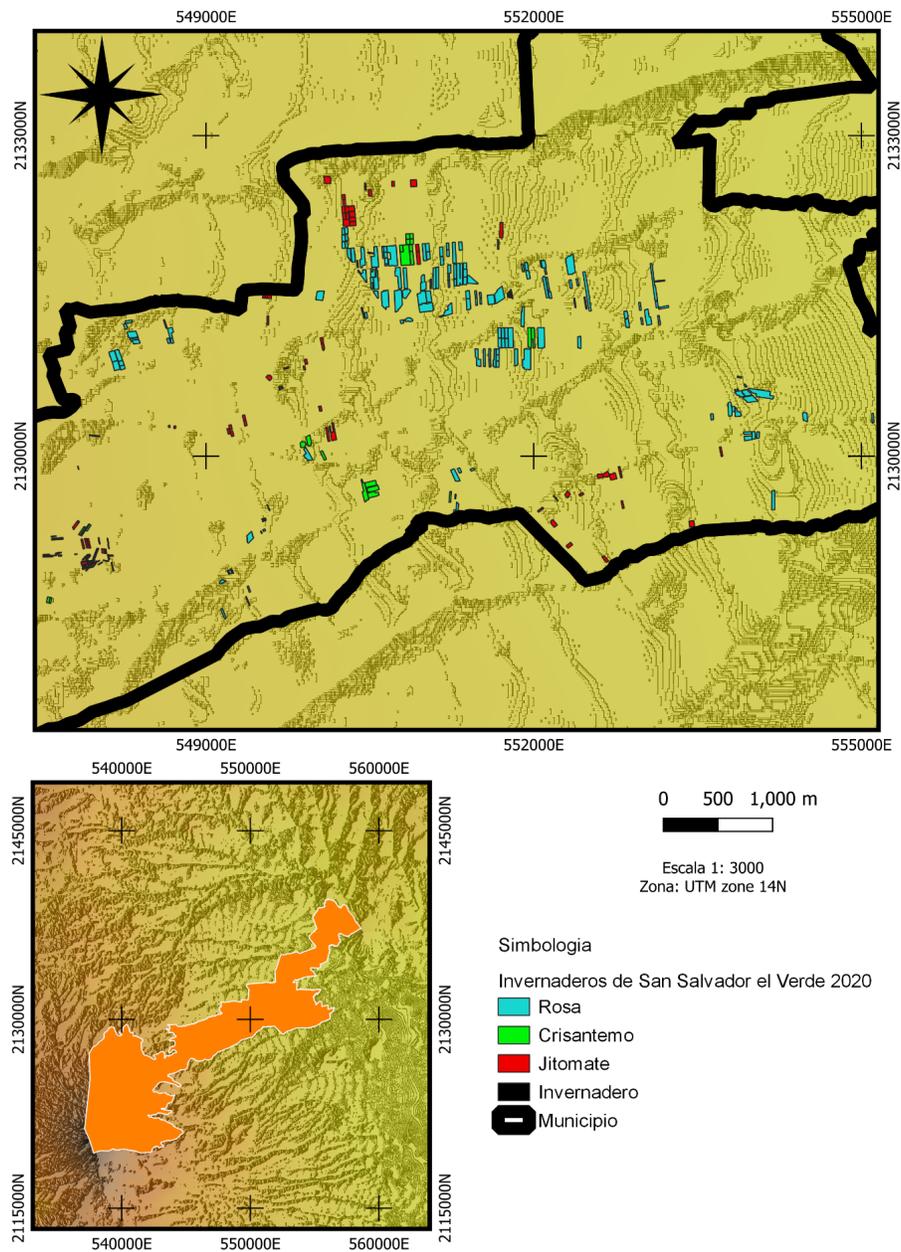
Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2020.

Cultivo	Superficie (ha)		
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada
Rosa	119	119	0
Crisantemo	14.2	14.2	0

²⁵Comúnmente llamados: *Traspatio*

Figura 4.2.4

Invernaderos en San Salvador el Verde, 2020.



Los datos cuantitativos del análisis del mapa de localización de los invernaderos en el año 2020, presentado en la figura 4.2.4, se presentan en la tabla 4.2.6. Es notoria la diferencia a los datos obtenidos por el SIAP y los de la presente investigación usando SIG, por ejemplo: para el cultivo de Rosa existe una diferencia de 65 (ha). A pesar de ello, es importante tener en cuenta que persiste un crecimiento en la agricultura protegida en el periodo de 2015 a 2020. Tomando la diferencia de los totales de las tablas 4.2.4 y 4.2.6 el crecimiento en superficie es de 41.76 (ha).

Tabla 4.2.6*Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2020.*

Cultivo	Instalación	Cantidad	Hectáreas (ha)
Rosa		186	51.31
Crisantemo	Invernadero	29	7.62
Jitomate		128	13.38
Desconocido		386	52.83
Total		729	125.14

Tasa de cambio de 2015 a 2020 de la agricultura protegida

Para determinar el porcentaje anual del crecimiento de la agricultura protegida en el periodo de 2015 a 2020, se hace uso de la ecuación 4.3. En la ecuación 4.3, se vuelven a sustituir los valores totales de las tablas 4.2.4 y 4.2.6 y el resultado es la tasa de cambio o el porcentaje anual de crecimiento de la agricultura protegida.

$$TC_{2015-2020} = \left[\left(\frac{125,14}{83,38} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 \right] * 100 \quad (4.3)$$

$$TC_{2015-2020} = 8,4\%.$$

La $TC_{2015-2020}$ es de 8.4%, para el periodo del 2015 a 2020, lo que demuestra que hubo una menor variación de la superficie destinada a la agricultura protegida; si se compara la $TC_{2010-2015} = 12.79\%$ con la $TC_{2015-2020} = 8.4\%$, se observa que el porcentaje anual de la tasa de crecimiento en el periodo 2015 a 2020 es menor. Debemos tomar en cuenta que la tasa de cambio, definida en la ecuación 3.1, solo mide cuánto ha variado la superficie (ha) de agricultura protegida en el 2020, respecto a al valor inicial de la superficie (ha) en el 2015. El crecimiento en superficie (ha) real, se puede evaluar hasta el momento en periodos de cinco años usando datos obtenidos por SIG, siendo para 2010 (45.67 (ha)), 2015 (83.38 (ha)) y 2020 (125.14 (ha)).

Los resultados del crecimiento de la superficie (ha) de la agricultura protegida, se pueden atribuir a diversos factores socioeconómicos presentados en la sección 4.1.1, y a partir de que en el año 2015 se implementó un programa Integral de desarrollo rural dirigido a la agricultura familiar periurbana y traspatio (SAGARPA, 2015b). Esto quiere decir que, gracias a los requerimientos mínimos de especialización en el manejo de invernaderos, compactibilidad de este y con ayuda gubernamental dirigido a las familias de San

Salvador el Verde, Puebla para el desarrollo de esta actividad, fueron factores determinantes de crecimiento de la agricultura protegida de este periodo.

4.2.5. La agricultura protegida en 2022

En la figura 4.2.5, se muestra el mapa de localización de los invernaderos del año 2022 en San Salvador el Verde, si la comparamos con la figura 4.2.4, no se pueden identificar cambios significativos, esto debido al periodo transcurrido, el cual es de dos años. Sin embargo, de manera cuantitativa si hay cambios y son presentados en las tablas 4.2.7 (SIAP) y 4.2.8 (Investigación propia).

En la tabla 4.2.7, elaborada con datos del SIAP, se observa que la superficie de cultivos en agricultura protegida en el año 2022, no registro crecimiento de manera significativa respecto al año 2020. El crecimiento en superficie (ha) de la agricultura protegida en un periodo de dos años, según SIAP, para el cultivo de la Rosa es de 16 (ha) y para el cultivo de Crisantemo es de 3.3 (ha) (Ver Tablas 4.2.5 y 4.2.7).

Tabla 4.2.7

Producción agrícola de rosa y crisantemo, 2022.

Cultivo	Superficie (ha)		
	Sembrada	Cosechada	Siniestrada
Rosa	135	135	0
Crisantemo	17.5	17.5	0

Usando SIG, se elaboró la tabla 4.2.8 en la que se cuantifica el número de instalaciones de agricultura protegida y su superficie (ha) para el mapa presentado en la figura 4.2.5. Las diferencias en los totales de las tablas 4.2.8 y 4.2.6, muestran que el crecimiento en el número de invernaderos en un periodo de dos años es de 126 y en superficie es de 26.74 (ha). Este resultado confirma que la agricultura protegida, en años anteriores, ha tenido un crecimiento notable en lo que llamamos comúnmente *Agricultura de Traspatio*.

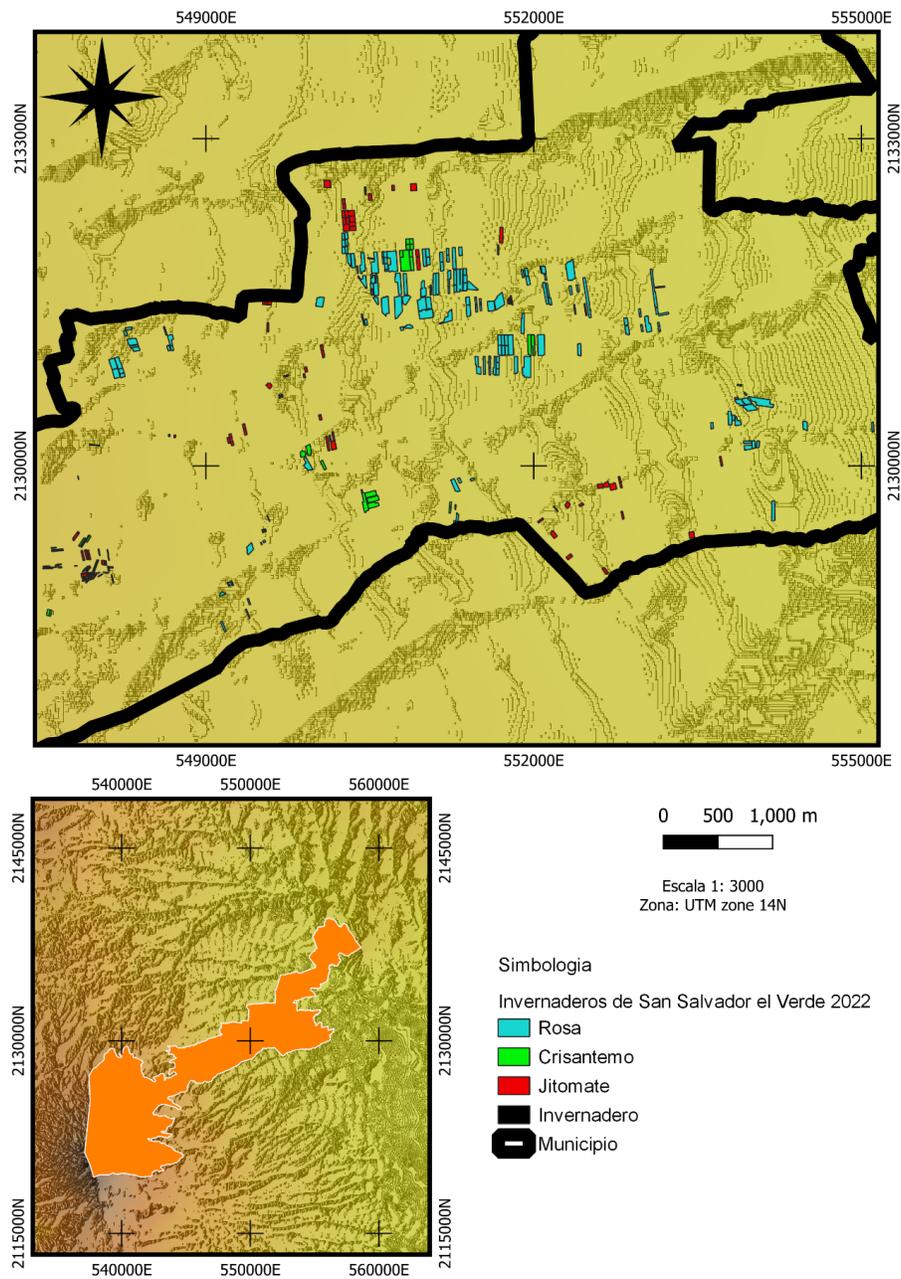
Tabla 4.2.8

Producción agrícola de rosa, crisantemo y jitomate 2022.

Cultivo	Instalación	Cantidad	Hectáreas (ha)
Rosa	Invernadero	239	51.31
Crisantemo		29	7.62
Jitomate		128	13.38
Desconocido		459	79.57
Total		855	151.88

Figura 4.2.5

Invernaderos en San Salvador el Verde, 2022.



Como en los periodos anteriores de cinco años, para el periodo de dos años (2020-2022), se determina el porcentaje anual de la tasa de cambio, a partir de los totales de las superficies de las tablas 4.2.8 y 4.2.6. La ecuación 4.4, se usa para determinar la $TC_{2020-2022}$.

$$TC_{2020-2022} = \left[\left(\frac{151,88}{125,14} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] * 100 \quad (4.4)$$

$$TC_{2020-2022} = 10,1 \%$$

El porcentaje anual de la tasa de cambio para el periodo de año 2020 al año 2022, es de 10.1 %, lo que indica que hay una mayor variación de la superficie dedicada a la agricultura protegida en el año 2022, respecto al valor de referencia del año 2020; si lo comparamos con el valor de la $TC_{2015-2020} = 8.4 \%$.

Es importante mencionar que el resultado, en este periodo de tiempo, puede estar influenciado por la emergencia sanitaria causada por la pandemia generada por el virus SARS-CoV-2 (COVID-19). Este acontecimiento mundial impulsó de manera indirecta la cultura que tiene la mayoría de los pobladores en México. En el periodo de 2020-2022, la producción de plantas ornamentales no se vio afectada, gracias a las costumbres de los pobladores para despedir a aquellos familiares que fallecieron a causa del COVID-19, si bien es un hecho que se suspendieron algunos eventos familiares (día festivos como 14 de febrero o 10 de mayo) y religiosos (fiestas de pueblo, bautizos, comuniones, bodas, etc.), el respectivo funeral se seguía realizando en donde la presencia de flores estéticas se visualizaban en coronas, adornos (Crisantemo) y ramos de flores (Rosa y Gladiola). Esto se puede visualizar, como un factor social-cultural determinante que provoco el crecimiento de la superficie (ha) de la agricultura protegida.

4.2.6. Porcentaje anual del crecimiento para el periodo 2010-2022.

Finalmente, se realizó el cálculo del porcentaje anual del crecimiento de la agricultura protegida en superficie (ha), a partir de la tasa de cambio para el periodo del 2010-2022, con datos totales de las tablas 4.2.2 y 4.2.8 y la ecuación 4.5:

$$TC_{2010-2022} = \left[\left(\frac{151,88}{45,37} \right)^{\frac{1}{12}} - 1 \right] * 100 \quad (4.5)$$

$$TC_{2010-2022} = 10,59 \%$$

El resultado de la ecuación 4.5, indica que la variación en el crecimiento de superficie (ha) de agricultura es del 10.59 % anual, respecto al valor inicial de 45.37 (ha) del año 2010.

4.2.7. Modelo de crecimiento de la agricultura protegida

Los resultados presentados muestran un claro crecimiento de la agricultura protegida en el municipio de San Salvador el Verde. En la tabla 4.2.9 se presenta un resumen del número de invernaderos y la superficie (ha), datos de la presente investigación, en los periodos discutidos en las secciones anteriores.

Tabla 4.2.9

Crecimiento de la agricultura protegida en San Salvador el Verde en el periodo del año 2010 al año 2022.

Año	Instalaciones	Hectáreas (ha)
2010	231	45.67
2015	413	83.38
2020	729	125.14
2022	855	151.88

Los datos de la tabla 4.2.9, se ajustaron a tres modelos distintos. Las figura 4.2.6 presenta el ajuste de los modelos *Lineal*, *Exponencial* y *Polinomial* para predicción del crecimiento del número de invernaderos en función del tiempo (Año). Por tanto, la figura 4.2.7, presenta el ajuste con las mismas funciones, respecto al crecimiento de la superficie (ha) en función del tiempo (Año).

Las funciones de ajuste son las presentadas en las siguientes ecuaciones: modelo *Lineal* 4.6, modelo *Exponencial* 4.7 y modelo *Polinomial* 4.8.

$$f(x) = ax + b \quad (4.6)$$

$$g(x) = ae^{(bx)} \quad (4.7)$$

$$h(x) = ax^2 + bx + c \quad (4.8)$$

Los valores de los coeficientes de determinación, R^2 , para todos los ajustes de los modelos se presentan en la tabla 4.2.10 y las figuras 4.2.6 y 4.2.7. Los valores de R^2 , muestran que para los tres modelos propuestos correlacionan de manera correcta. Si se toma a R^2 , como un criterio para elegir la función que mejor ajusta a los datos de la tabla 4.2.9 tanto para predecir el crecimiento del número de invernaderos, como la superficie (ha) en función del tiempo (Año), es la función *Polinomial* con valores de 0.9988 y 0.9975; respectivamente. Sin embargo, reportes del portal Imagen Agropecuaria indican que el crecimiento de la Agricultura protegida, ha tenido un crecimiento exponencial en la última década ([Imagen-Agropecuaria, 2012](#)). Por tanto, el modelo de crecimiento, que usaremos para predecir el número de instalaciones y superficie (ha) destinada a la agricultura protegida en San Salvador el Verde, es el *Exponencial*.

Tabla 4.2.10

Coefficientes de determinación (R^2) para los modelos de ajuste para el crecimiento de la agricultura protegida.

Modelo	Año <i>v/s</i> Invernaderos	Año <i>v/s</i> Superficie (ha)
Lineal	0.9836	0.9911
Exponencial	0.9978	0.9911
Polinomial	0.9988	0.9975

Figura 4.2.6

Modelos de crecimiento del número de invernaderos en el periodo del año 2010 al año 2022.

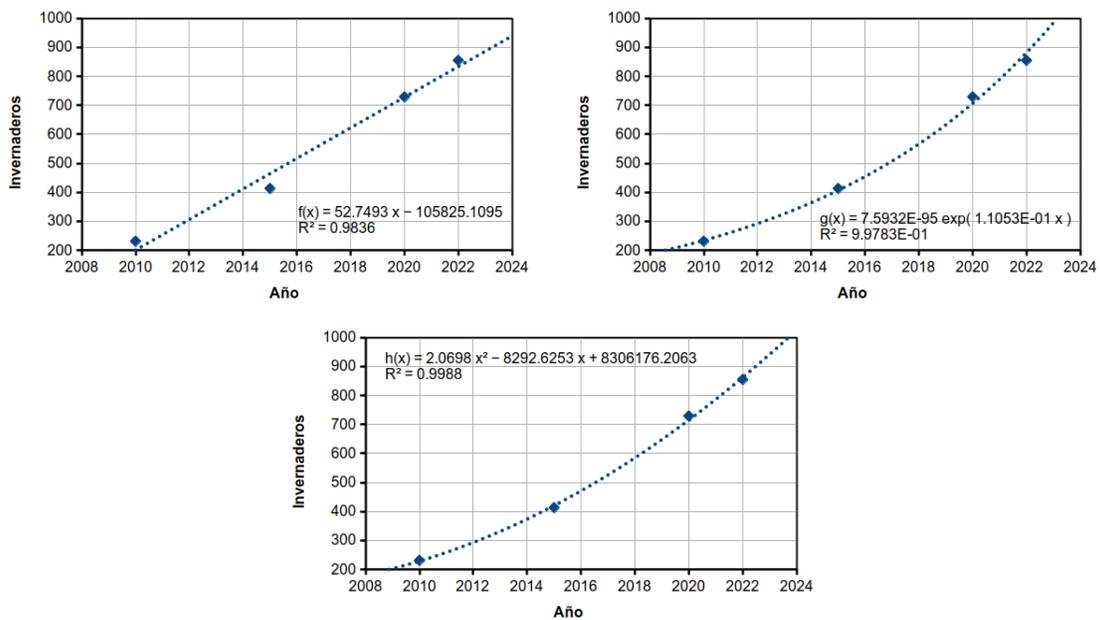
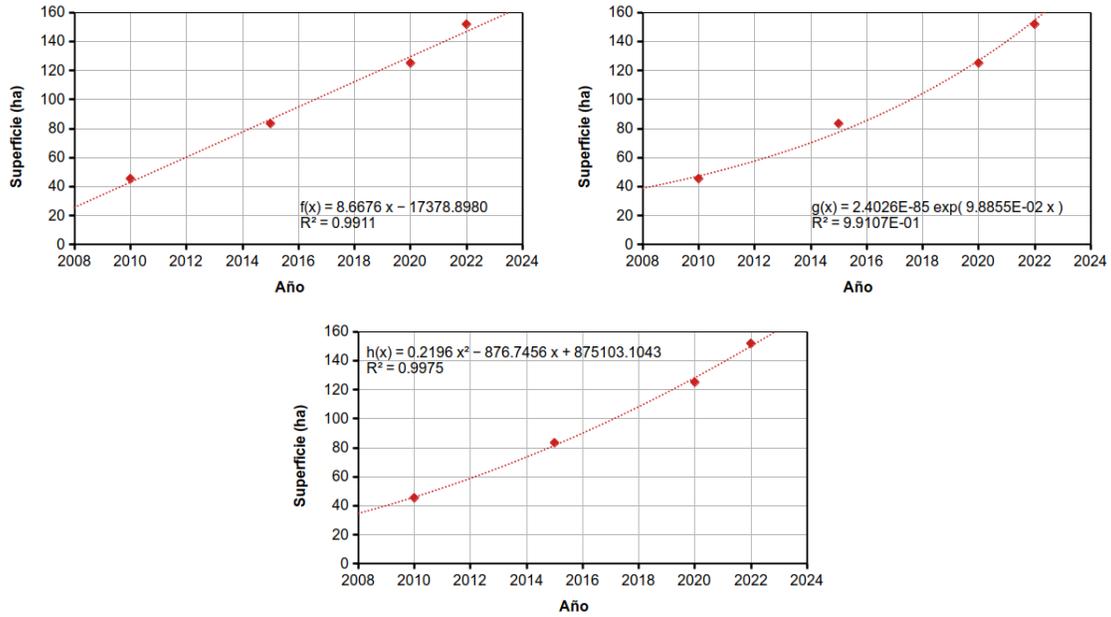


Figura 4.2.7

Modelos de crecimiento de la superficie (ha) de invernaderos en el periodo del año 2010 al año 2022.



Las ecuaciones propuestas como modelo de ajuste es la función *Exponencial*. Para predecir el crecimiento del número de invernaderos en función del tiempo (Año) es la ecuación 4.9,

$$g(x) = 7,5932E-95e^{(1,10053E-01x)}, \quad (4.9)$$

y para predecir el crecimiento de la superficie (ha) en función del tiempo (Año) es la ecuación 4.10,

$$g(x) = 2,4026E-85e^{(9,8855E-02x)}. \quad (4.10)$$

La aplicación del modelo *Exponencial*, se realizó para la predicción de la superficie (ha) para el año 2016, usando la ecuación 4.10. Esto es debido a que para el año 2016 se cuenta con datos del censo agropecuario. El resultado de sustituir el año 2016, en la ecuación 4.11 es:

$$\begin{aligned} g(2016) &= 2,3036E-85e^{(9,8855E-02(2016))} \\ h(2016) &= 85,49 \text{ (ha)}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

El resultado indica que para el año 2016 la superficie (ha) destinadas a la agricultura protegida es de 85.49 (ha). Sin embargo, datos oficiales del censo agropecuario del INEGI del 2016 reportan 197.25 (ha) destinadas a la agricultura protegida en San Salvador el Verde. La discrepancia es del orden de 111.76 (ha), entre el valor reportado por INEGI y el valor predicho por el modelo de la ecuación 4.11 determinado a

partir de uso de SIG.

Una explicación a la diferencia de 111.76 (ha) sobrestimadas por el censo del INEGI del 2016, se realizó mediante un análisis geoespacial de la ubicación de los invernaderos. Se consultó el mapa digital de INEGI (ver Figura 4.2.8), y con filtros correspondientes a la actividad y lugar de estudio, se identificó que en algunas ubicaciones donde se registran cultivos de Rosa, se tiene una superficie mayor a la superficie (ha) real del invernadero, determinada usando SIG en especial la herramienta QGIS.

Figura 4.2.8

Superficie identificada de Rosa en agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla.



En la figura 4.2.9 (arriba), se aprecia una superficie mayor marcada en color blanco, para cada localización de los invernaderos. A diferencia de la superficie (ha) real, que muestra el mapa (abajo) realizado con filtros por actividad (tipo de cultivo). Si se comparan las superficies (ha) de color blanco y color rosa, se puede observar una clara sobreestimación realizada en el censo del INEGI del 2016, en el cual se tomó como superficie (ha) total del invernadero la superficie del total del predio. La superficie (ha) que marca el documento que acredita la posesión legal del predio donde se localiza la estructura del invernadero y no hubo registro del área real con la estructura dedicada a la agricultura protegida.

Figura 4.2.9

Superficie identificada de Rosa en agricultura protegida en San Salvador el Verde, Puebla. Datos del censo del INEGI 2016, polígonos en blanco (arriba), datos de la investigación, polígonos en rosa (abajo).



4.3. Impacto ambiental causado por la agricultura protegida

4.3.1. Contaminación a los recursos naturales

Contaminación del suelo

El análisis de suelos es una herramienta de gran utilidad para diagnosticar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización para un cultivo a establecer o correcciones en un cultivo establecido. De manera adicional, el análisis de suelos se puede usar para evaluar de manera indirecta el impacto ambiental generado por la presencia elementos químicos que tienen su origen en los fertilizantes de origen mineral y se encuentran en concentraciones altas en el suelo. La interpretación del análisis de suelo, se basa en estudios de correlación y calibración con la respuesta de las plantas a la aplicación de los niveles adecuados de los nutrientes que necesita. Cuando el nivel de un nutriente se encuentra por debajo o por encima del nivel óptimo, el crecimiento de la planta se verá afectado en forma negativa o positiva según dicha concentración (Molina, 2007).

El principio básico de un programa de análisis de suelos es que el terreno se le pueda hacer un muestreo en forma tal que el análisis químico de las muestras recolectadas refleje con precisión el estado actual del suelo (Castellanos, 2000). Para dar cumplimiento al principio básico del análisis de suelo y el de evaluar el impacto ambiental en el suelo; se realizó un estudio en un cultivo bajo las condiciones de agricultura protegida en un invernadero de San Salvador el Verde, donde se cultiva Crisantemo desde hace diez años de manera ininterrumpida. Los resultados del estudio, a pesar de que no se realizaron en un laboratorio certificado, se presentan a continuación.

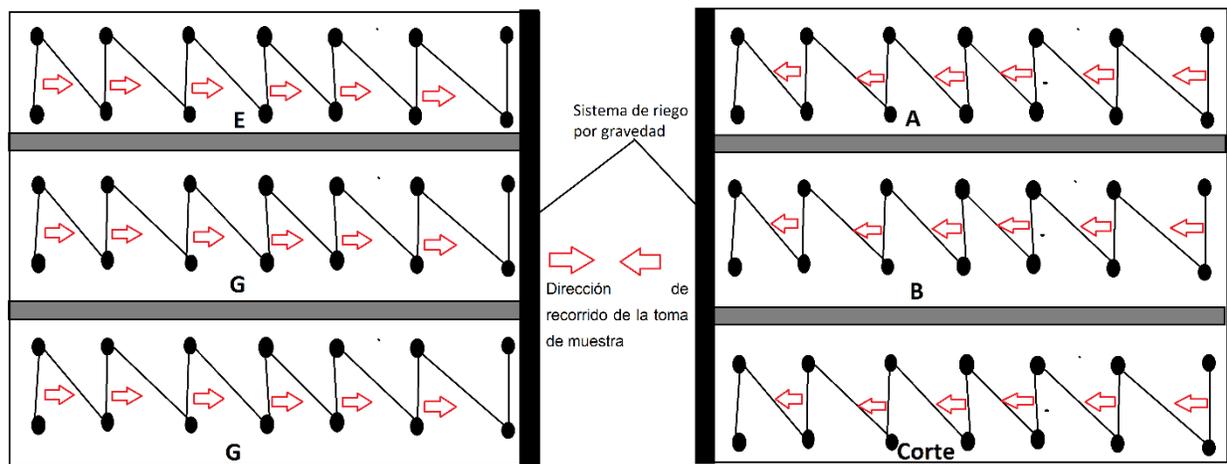
Como punto de inicio se realizó el geoposicionamiento²⁶ del invernadero y se elaboró un croquis del mismo identificando áreas homogéneas para la toma de la muestra. En la figura 4.3.1 se muestra el croquis, donde se pueden observar las áreas homogéneas en las que se dividió el área del invernadero. Las áreas homogéneas se dividieron con base en las etapas fenológicas identificadas de acuerdo a la clasificación presentada en la sección 2.4.4. La figura 4.3.2, presenta las áreas: (A) Vegetativa I, (B) Vegetativa II, (E) Botón garbanzo, (G) Cosecha y una área (P) de postcosecha²⁷.

²⁶Localización: <https://goo.gl/maps/ebT424kR9NFSjwkm9>

²⁷No presente en la figura, pero sí considerada para el análisis.

Figura 4.3.1

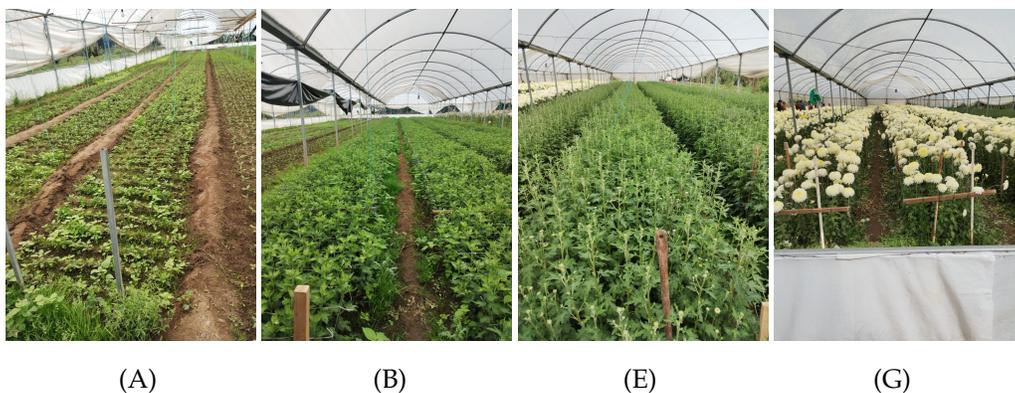
Croquis del invernadero de Crisantemo ubicado en San Salvador el Verde



Nota. Los puntos marcados en color negro, representan los puntos de muestreo para la composición de la muestra compuesta.

Figura 4.3.2

Etapas de fenológicas del cultivo de Crisantemo identificadas en el invernadero



Por cada área, identificada, se consideró una muestra compuesta, se secó para su análisis de acuerdo con la metodología presentada en la sección 3.3.1. Los resultados se resumen en la tabla 4.3.1, los cuales incluyen análisis de dos áreas más de cultivos de agricultura a cielo abierto: (As) Alstroemeria (con riego) y (Ce) Cempasuchil (sin riego). Los valores de la tabla 4.3.1 son comparados con los valores recomendados por Osorio (2012), para la fertilización del suelo en el cultivo de Crisantemo (Ver Tabla 4.3.2).

Los resultados muestran que los valores de los Macronutrientes, Nitratos (NO_3^-), Calcio (Ca^{2+}), Potasio (K^+) se encuentran por debajo de los niveles recomendados para la fertilización del suelo en el cultivo de

Tabla 4.3.1*Análisis nutrimental de suelo para cultivo de Crisantemo en invernadero de San Salvador el Verde.*

Área	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	σ ^a	pH
(A)	89	38	7	5	238	7.0
(B)	130	64	6	4	334	6.8
(E)	200	81	6	11	546	6.6
(G)	120	59	9	8	380	6.1
(P)	51	28	4	5	159	7.2
(As)	72	25	11	1	162	5.9
(Ce)	150	44	6	6	324	5.8

Nota. ^aConductividad eléctrica reportada en μS/cm medida en extracto suelo/agua (0.5/1.5). Valores reportados en ppm.

Tabla 4.3.2*Valores nutrimentales de suelo recomendado para el cultivo de Crisantemos.*

Macronutrientes	Intervalo adecuado
Nitrógeno	150-200
Potasio	234.6-312.8
Calcio	3910-5865
pH	5.8-6.2
σ ^a	1000-2000

Nota. ^aConductividad eléctrica reportada en μS/cm medido en extracto de pasta saturada. Valores reportados en ppm. Datos reportados por Osorio (2012).

crisantemo. Incluso en las áreas o etapas fenológicas (E) y (G) de mayor demanda de Macronutrientes. Los niveles de Sodio (Na⁺) son muy bajos en todas las etapas. La conductividad eléctrica (σ), se encuentra por debajo de la reportada como óptima para el cultivo de crisantemo y es el reflejo de que los niveles de los Macronutrientes se encuentren por debajo de lo ideal, sin llegar a tener un valor de 4000 μS/cm, lo que sería indicativo de problemas de salinidad en el suelo. Los niveles de pH, en todas las etapas fenológicas del cultivo de crisantemo, se encuentran ligeramente por encima del valor reportado como óptimo, no representa un problema para el desarrollo del cultivo. Finalmente, es importante resaltar que la demanda de Macronutrientes en agricultura protegida es siempre mayor, y se puede observar que la aplicación de ellos es mayor en comparación en agricultura a cielo abierto con cultivos también de ornamentales en donde los niveles de pH son ligeramente más ácidos.

4.3.2. Contaminación de percepción: visual y térmica

Contaminación visual

La contaminación visual es cualquier alteración del paisaje natural o artificial cuya percepción afecta negativamente al observador. Es un tipo de contaminación ocasionado por el uso excesivo de diferentes elementos ajenos al ambiente que alteran la estética o imagen de un paisaje, el cual puede ser natural o artificial, afectando las condiciones, la calidad de vida y las funciones vitales de los seres vivos (Solorio-Resendiz, 2021). Por tanto, la percepción ambiental es el proceso de conocer el ambiente físico inmediato a través de los sentidos y no todos pueden tener la misma afinidad, pero la mayoría de las personas tienden a sorprenderse cuando se percatan que la materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas alteran dicho espacio, y en el caso de la agricultura protegida, no es la excepción, ya que para que esta se lleve a cabo, es necesario la construcción de estructuras que puedan resguardar los cultivos de las condiciones climáticas.

En la figura 4.3.3, se muestra un tipo de invernadero de San Salvador el Verde, de una vista frontal, algunos de ellos fueron construidos de manera multimodular (combinación de varios invernaderos en una sola estructura), lo cual abarca más espacio, esto quiere decir que la visibilidad de una persona se ve afectada.

Figura 4.3.3

Invernaderos multimodulares de San Salvador el Verde, 2022.



Los principales problemas que puede padecer una persona sujeta a contaminación visual son estrés, dolor de cabeza, mareos, ansiedad. Además, pueden existir otros daños como distracciones peligrosas, especialmente personas al volante, problemas de atención, disminución de la eficiencia laboral, mal humor, trastornos de agresividad (Jerez-Paredes de Sajché, 2007). Otros efectos que la contaminación visual provoca en la población, es la causa de alteraciones del sistema nervioso, impedimentos de tránsito libre, la estética se ve afectada, desmejoramiento panorámico, problemas ecológicos que conllevan a que las especies se alejen (Gallardo-Pacheco, 2011).

Contaminación térmica

La temperatura superficial en San Salvador el Verde, se estimó usando imágenes satelitales del portal de USGS Earth Explore Landsat 8 (mayo, 2022) y la ecuación 4.12.

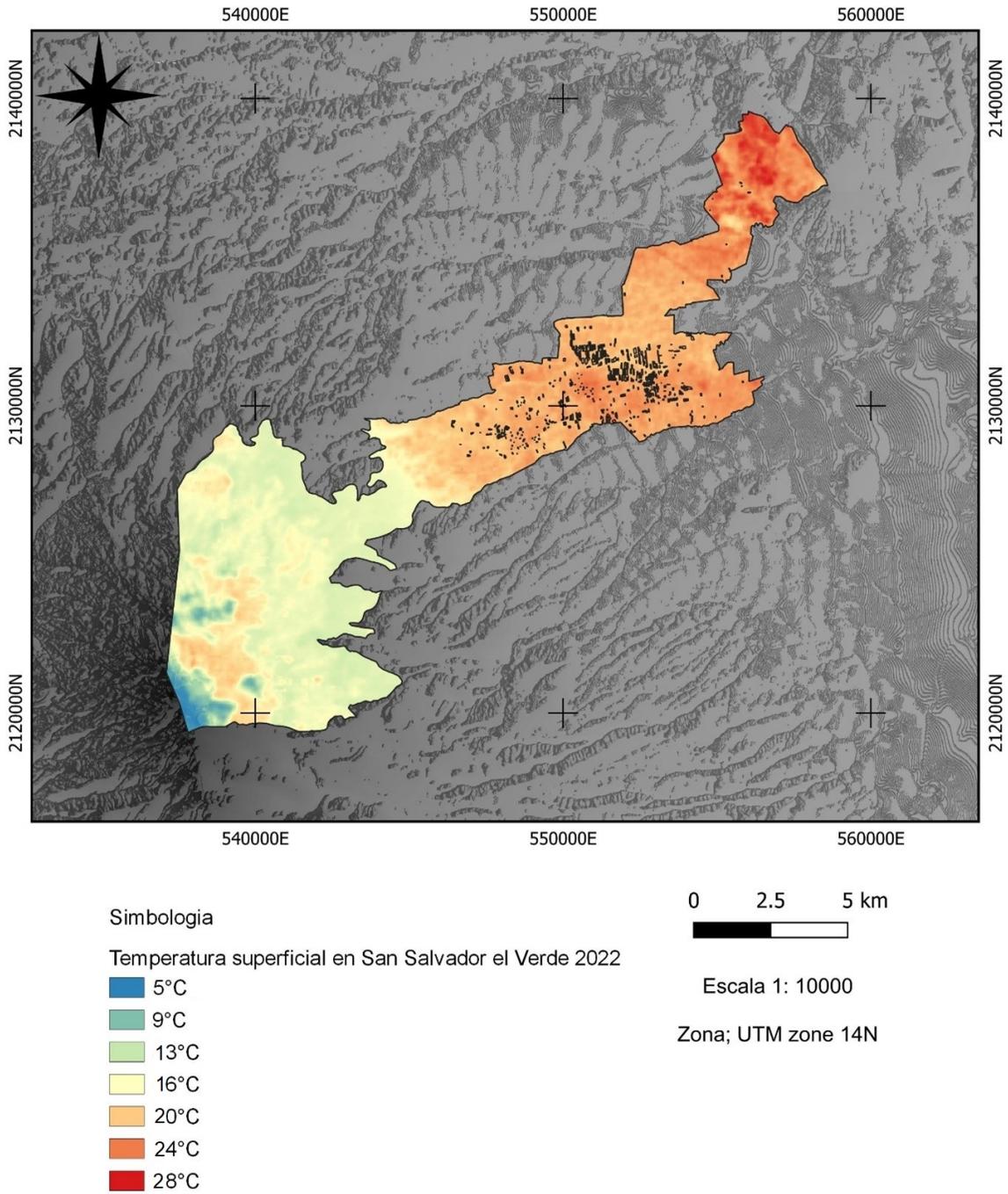
$$T = \left(\frac{321,08}{\ln \left(\frac{774,89}{(3,3420E^{-04}(\text{banda10.tif})+0,1)} + 1 \right)} \right) - 273,15. \quad (4.12)$$

En el mapa de la figura 4.3.4, se muestra la temperatura superficial de San Salvador el Verde. Se puede observar que en el intervalo de 20 - 24° C se concentran la mayor parte de invernadero. En el área con temperatura de 28° C, se atribuye a su cercanía con el municipio de San Martín Texmelucan, donde hay mayor desarrollo urbano, comercial e industrial, razón por la cual las temperaturas son mayores.

Sin llegar, a ser un problema de contaminación térmica, la reflexión causada por las cubiertas plásticas de los invernaderos, pueden llegar a causar un incremento de la temperatura superficial a sus alrededores.

Figura 4.3.4

Temperatura superficial de San Salvador el Verde, Puebla, mayo del 2022.



Conclusiones

En este trabajo de tesis se estudiaron los factores determinantes que impulsan el desarrollo de la agricultura protegida en San Salvador el Verde. A partir del análisis socioeconómico y sociocultural, se determinó que los principales factores que influyen en el crecimiento de las instalaciones destinadas a la agricultura protegida son el precio de los materiales utilizados y el acceso a los apoyos gubernamentales. Además, se desarrolló un modelo basado en tecnologías digitales, usando imágenes satelitales procesadas en Sistemas de Información Geográfica, que describe el crecimiento exponencial de la agricultura protegida en la región de San Salvador el Verde para el periodo de 2010-2022. Este modelo permite visualizar el crecimiento y la expansión de la actividad y puede ser utilizado para proyectar su evolución futura. Por otro lado, los impactos ambientales de la agricultura protegida en el suelo son mínimos en los cultivos de crisantemo, debido a que la presencia de macronutrientes se encuentra por debajo de los niveles óptimos para el cultivo. Sin embargo, sería necesario extender el estudio nutrimental a una mayor cantidad de instalaciones de invernaderos para corroborar de manera inequívoca estos resultados. Finalmente, este trabajo de tesis ha contribuido al conocimiento de los factores determinantes del crecimiento de la agricultura protegida en San Salvador el Verde y ha demostrado que esta actividad puede ser realizada de manera sostenible y responsable con el medio ambiente.

Referencias

- Acciona. (2022). *¿En que consiste la sostenibilidad?* https://www.acciona.com/es/desarrollo-sostenible/?_adin=02021864894.
- Armendáriz-Erives, S. (2007). Desafíos y riesgos agrícolas ante el calentamiento global. *UACH-URUZA*, 73-79.
- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Randall, J. M., y Meneses, J. F. (1999). Greenhouse ventilation rate: theory and measurement with tracer gas techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(4), 363–374. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002186349890381X>.
- Barboza, M. N. (2005). El rezago educativo en México: dimensiones de un enemigo silencioso y modelo propuesto para entender las causas de su propagación. *Revista Interamericana de Educación de Adultos*, 27(2), 29–70.
- Bembibre, V. (2022). *Definición de cultivo*. <https://www.definicionabc.com/general/cultivo.php#:~:text=El%20cultivo%20es%20la%20acci%C3%B3n,para%20la%20plantaci%C3%B3n%20de%20alimentos>.
- Bosque-González, I., Fernández-Freire, C., Martín-Forero Morente, L., y Pérez-Asensio, E. (2012). *Los sistemas de información geográfica y la investigación en ciencias humanas y sociales*. Confederación Española de Centros de Estudios Locales. <https://digital.csic.es/handle/10261/64940>.
- Bragazza, L., Freeman, C., Jones, T., Rydin, H., Limpens, J., Fenner, N., ... Hájek, T. (2006). Atmospheric nitrogen deposition promotes carbon loss from peat bogs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(51), 19386–19389.
- Cal-IPC. (2006). *California invasive plant inventory. cal-ipc publication 2006-02*. California Invasive Plant Council Berkeley, CA.
- Castellanos, J. Z. (2000). *Guía para la interpretación del análisis de suelo y agua*. Intagri.
- Contreras-Servín, C. (1995). Cartografía histórica de México. *Boletín del Archivo General de la Nación*, 4(06), 13–36.
- Corona-Ramírez, I. (2016). El desarrollo de la agricultura y el impacto que tendría en las finanzas públicas de México. *Premio de las Finanzas Públicas*.
- Crespo-Stupkova, L. (2020). Estudio de agricultura protegida en el valle de Zamora Jacona. *Observatorio de Agricultura y del Medio Ambiente del Occidente de México*.

- Días-Quispe, V. A. (2017). *La contaminación ambiental* (Bachelor's Thesis, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI). <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4101/1/T-UTC-0313.pdf>.
- EcuRed. (2022). *Planta ornamental*. https://www.ecured.cu/Planta_ornamental.
- Equipo editorial, E. (2022). *10 ejemplos de actividades agrícolas*. <https://www.ejemplos.co/10-ejemplos-de-actividades-agricolas/>.
- FAO. (2013). *El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas*. <https://www.fao.org/3/i3361s/i3361s.pdf>.
- FAO. (2015). World fertilizer trends and outlook to 2018. *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Reporte*.
- FAO. (2018). *La agricultura urbana y periurbana*. <https://www.fao.org/urban-peri-urban-agriculture/es>.
- FAO. (2022). *El manejo de suelos afectados por la salinidad*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-afectados-por-salinidad/es/>.
- FIRCO. (2017). *Fideicomiso de riego compartido*. blog. <https://www.gob.mx/firco/articulos/agricultura-de-traspatio-produccion-agricola-en-beneficio-de-comunidades-marginadas?idiom=es>.
- Gallardo-Pacheco, R. F. (2011). Propuesta de regulación del diseño publicitario de rotulación en el centro histórico de la ciudad de Latacunga para combatir la contaminación visual existente. *Latacunga, Ecuador*.
- García-Suárez, M.-D. (2020). *México país de muchas flores. cultivo a cielo abierto o invernadero*. <https://tecnoagro.com.mx/no.-135/mexico-pais-de-muchas-flores-cultivo-a-cielo-abierto-o-invernadero>.
- Garrido-Valero, M. S. (1993). *Interpretación de análisis de suelos: Guía práctica para muestrear los suelos e interpretar sus análisis* (Vol. 5/93). Rivadeneyra, S. A. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1993_05.pdf.
- González-González, M. J., y Pereira-García, I. (2016). Los sig en la docencia e investigación. En *Nativos digitales y geografía en el siglo xxi: educación geográfica y sistemas de aprendizaje* (pp. 575–589). Asociación de Geógrafos Españoles : Universidad de Alicante. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7394121>.
- González-García, L. (1993). Nuevas relaciones entre educación, trabajo y empleo en la década de los 90. *Revista Iberoamericana de educación - Educación, Trabajo y Empleo*, 2(4), Online. <https://rieoei.org/historico/oeivirt/rie02a03.htm>.
- GRN. (2020). *Definición de impacto ambiental. gestión en recursos naturales*. <https://www.grn.cl/impacto-ambiental.html#:~:text=El%20impacto%20ambiental%20es%20la,hombre%20c%20de%20la%20naturaleza>.
- Han, J., Shi, J., Zeng, L., Xu, J., y Wu, L. (2015). Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2976–2986.

- Heim, K. A. (2002). Régimen de humedad. relación internacional ecológica. *Revista Española*, 4.
- Hernández-Puig, S. (2016). El periurbano, un espacio estratégico de oportunidad. *Biblio3W Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 31(1.160), 1–21. <https://revistes.ub.edu/index.php/b3w/article/view/26341/27795>.
- IGNE. (2019). *¿Que es la teledetección?* <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>.
- Imagen-Agropecuaria. (2012). *Agricultura protegida crece y alcanza un valor de mercado de 47.1 mil mdp*. Descargado de <https://imagenagropecuaria.com/2022/agricultura-protegida-crece-y-alcanza-un-valor-de-mercado-de-47-1-mil-mdp/>
- INEGI. (2016a). *Instituto nacional de estadística y geografía. geografía y medio ambiente. climatología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>.
- INEGI. (2016b). *Instituto nacional de estadística y geografía. geografía y medio ambiente. edafología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>.
- Infoagro. (2017). *Nutrientes presentes en el suelo*. <https://mexico.infoagro.com/nutrientes-presentes-en-el-suelo/>.
- Jerez-Paredes de Sajché, M. T. (2007). *Eficacia de las medidas legales existentes para evitar la contaminación visual en la ciudad de Guatemala* (Bachelor's Thesis, Universidad de San Carlos de Guatemala). http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/04/04_7038.pdf.
- Jiménez-Merino, F. A. (2010). *Puebla; una estrategia para el desarrollo del campo*. <https://jimenezmerino.com.mx/libros/PUEBLAUNAESTRATEGIA.pdf>.
- López-Trigal, L. (2015). Diccionario de geografía aplicada y profesional: terminología de análisis, planificación y gestión del territorio. *Diccionario de geografía aplicada y profesional*, 1–677.
- Machín-Barroso, N., y López-Manzanares-Fernández, F. (2012, Jun). *Agricultura y medio ambiente: Equilibrio territorial*. https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/pta_458_Criterios%20ambientales.pdf. SERVICIO TÉCNICO DE AGROINDUSTRIAS E INFRAESTRUCTURA RURAL.
- Molina, E. (2007). *Análisis de suelos y su interpretación*. San José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International.
- Moreno-Reséndez, A., Aguilar-Durón, J., y Luévano-González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29(1345-2016-104296), 763–774.
- Moya-Talens, J. A. (2009). *Riego localizado y fertirrigación*. Mundi-Prensa Libros.
- Novagric. (2016). *Cultivos en invernadero: Invernaderos de flores*. <https://www.novagric.com/es/blog/articulos/cultivos-invernadero-flores>. APR Green Houses.
- Olaya, V. (2009). Sistemas de información geográfica. *Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano*, 1(8), 1–6. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3113707>.
- Osorio, W. (2012). Niveles adecuados de fertilidad del suelo y análisis foliares para crisantemo. *Bol Manejo Integr Suelo Nutr Veg*, 1(7), 1–4.

- Padilla-Bernal, L. E., Lara-Herrera, A., Rodríguez, A. V., y Loureiro, M. L. (2018). Views on sustainability and the willingness to adopt an environmental management system in the mexican vegetable sector. *International Food and Agribusiness Management Review*, 21(3), 423–436.
- Palacio-Prieto, J. L. (2004). *Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial*. Instituto Nacional de Ecología.
- Paz, R., y Bruno, S. (2013). El potencial de la agricultura familiar y los espacios protegidos: lineamientos para el diseño de políticas públicas. *Mundo agrario*, 13(26), 01–28. <https://www.redalyc.org/pdf/845/84527468007.pdf>.
- Pérez-González, M. E., y García-Rodríguez, M. P. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 61, 285–308. Descargado de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/32690/>
- Pérez-Andrade, L. F. (2017). *Evaluación de una malla agrícola anti-insectos con propiedades antitéticas en el cultivo de tomate. (solanum lycopersicum)* (Tesis de Master, CIQA). <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/323>.
- Pérez-Porto, J., y Gardey, A. (2017). *Definición de cosecha*. <https://definicion.de/cosecha/#:~:text=Se%20denomina%20cosecha%20al%20acto,al%20conjunto%20de%20los%20frutos>.
- QGIS. (2009). Qgis geographic information system [Manual de software informático]. Descargado de <http://qgis.org>
- Rimache-Mijail, A. (2011). *Floricultura: Cultivo y comercialización*. Ediciones de la U.
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. <https://www.fao.org/3/i9183es/i9183es.pdf>. FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- SADER. (2016). *Tipos de cultivo, estacionalidad y ciclos*. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/tipos-de-cultivo-estacionalidad-y-ciclos>.
- SADER. (2017). *Tipos de estructura para la agricultura protegida*. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/tipos-de-estructura-para-la-agricultura-protegida>.
- SADER. (2018). *¿Cómo beneficia la agricultura a las familias mexicanas?* <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/como-beneficia-la-agricultura-a-las-familias-mexicanas>.
- SADER. (2021). *Agricultura protegida ubica a México entre los principales productores de frutas y hortalizas*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/agricultura-protegida-ubica-a-mexico-entre-los-principales-productores-de-frutas-y-hortalizas>.
- SAGARPA. (2015a). *Entrega sagarpa 348 mil pesos en apoyo a la soberanía alimentaria de Puebla*. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cpuebla/articulos/entrega-sagarpa-348-mil-pesos-en-apoyo-a-la-soberania-alimentaria-de-puebla>.
- SAGARPA. (2015b). *Entrega sagarpa 348 mil pesos en apoyo a la soberanía alimentaria de Puebla*. <https://www.gob.mx/agricultura%7Cpuebla/articulos/entrega-sagarpa-348-mil-pesos>

-en-apoyo-a-la-soberania-alimentaria-de-puebla.

- SAGARPA. (2018). *¿Qué productos se obtienen con la agricultura protegida?* <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/productos-que-nos-ofrece-la-agricultura-protegida>.
- Salazar-Sánchez, M. T., y Galicia-Martínez, M. (2006). La vulnerabilidad de la industria y los sistemas energéticos ante el cambio climático global. *Instituto de Geografía. UNAM.*
- Santamaria-Peña, J. (2011). *La cartografía y las proyecciones cartográficas*. Universidad la Rioja. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=492575>.
- Seale, y Associates, I. (2019). *Industria agrícola en el mundo*. http://mnamexico.com/ma_industria/agricultura-en-mexico/.
- SEDEMA. (2022). *Secretaría del medio ambiente de la ciudad de México. agricultura. glosario*. <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Agricultura>.
- Segrelles-Serrano, J. A. (2015). Agricultura periurbana, parques naturales agrarios y mercados agropecuarios locales: una respuesta territorial y productiva a la subordinación del campo a la ciudad. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 29(502), 1–35. <https://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/15107>.
- SEMARNAT. (2015). *Informe de la situación del medio ambiente en México. en compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y desempeño ambiental*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf.
- SEMARNAT. (2018). *Impacto ambiental y tipos de impacto ambiental*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/impacto-ambiental-y-tipos-de-impacto-ambiental>.
- SENASICA. (2016). *La aplicación de sistemas de protección garantiza la disposición de frutas y verduras todo el año. servicio nacional de sanidad, inocuidad y calidad agroalimentaria*. <https://www.gob.mx/senasica/articulos/conoce-que-es-la-agricultura-protegida?idiom=es#:~:text=La%20agricultura%20protegida%20es%20aquella,clima%20ocasionan%20a%20los%20cultivos./>.
- Shivanna, K. R., y Tandon, R. (2014). Phenology. En *Reproductive ecology of flowering plants: A manual* (pp. 19–23). New Delhi: Springer India. Descargado de https://doi.org/10.1007/978-81-322-2003-9_3 doi: 10.1007/978-81-322-2003-9_3
- SIAP. (2015). *Datos abiertos: Servicio de información agroalimentaria y pesquera*. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.
- SIAP. (2021). *Agricultura protegida ubica a México entre los principales productores de frutas y hortalizas*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/agricultura-protegida-ubica-a-mexico-entre-los-principales-productores-de-frutas-y-hortalizas>.
- Sinergia. (2017). *Impactos ambientales en agricultura*. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/Impactosambientales-en-agricultura.pdf>.
- Solorio-Resendiz, C. I. (2021). La contaminación visual en nuestro mundo actual. *Transferencia TEC*. <https://transferencia.tec.mx/2021/02/18/la-contaminacion-visual-en-nuestro-mundo-actual/>.

- Tecnoagro. (2010). *Producción de flores de corte y plantas de ornato en maceta*. <https://tecnoagro.com.mx/no.-61/produccion-de-flores-de-corte-y-plantas-de-ornato-en-maceta>.
- Torrent, J., Barberis, E., y Gil-Sotres, F. (2007). Agriculture as a source of phosphorus for eutrophication in southern europe. *Soil Use and Management*, 23, 25–35.
- UN. (2020). *Naciones unidas. acción por el clima*. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20se%20refiere,las%20variaciones%20del%20ciclo%20solar>.
- UNDP. (2019). *Documentación de apoyo, medio ambiente. programa de las naciones unidas para el desarrollo*. <https://eird.org/pr14/cd/documentos/espanol/Publicacionesrelevantes/Recuperacion/5-Med-Ambiente.pdf>.
- Varela-García, F.-A. (2013). *Análisis geoespacial para la caracterización funcional de las infraestructuras viarias en modelos de accesibilidad territorial utilizando sistemas de información geográfica* (Tesis Doctoral, Universidad de da Coruña). <https://core.ac.uk/download/pdf/61909431.pdf>.
- Villares-Guayasamín, D. C. (2018). *Determinación de grados d'la desarrollo en la fenología de siete variedades de chrysanthemum sp. en la florícola florisol* (Bachelor's Thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.) <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14248>.
- Viñas-Sumpsi, J. M. (1993). Agricultura y medio ambiente. *Revista Española de Financiación y Contabilidad*, 367–395.
- Yaron, B., Dror, I., y Berkowitz, B. (2014). *Soil-subsurface: change chemical pollutant impacts* (1.ª ed.). Springer Berlin.

Anexo A

Evidencias del análisis de suelos

A.1. Evidencias del análisis de suelos

Evidencias fotográficas de la toma de muestra y análisis de suelo en invernaderos del cultivo de Crisantemo en San Salvador el Verde.

Figura A1

Procedimiento del análisis nutricional del suelo en el laboratorio del TecNM campus ITSSMT.



a) Muestras de suelo

b) Matracas para relación suelo/agua



c) Relación 0.5/1.0 suelo/agua

Figura A2

Continuación de figura A1.



d) Aplicación de muestra de suelo al electrodo de pH y conductividad eléctrica.



e) Lectura de datos.