



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

---

---



**CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA**

**MOVILIDAD DE PLAGUICIDAS EN LA ZONA RADICULAR DEL  
CULTIVO DE *Gerbera jamesonii* EN INVERNADERO: MODELACIÓN  
GEOMÁTICA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS DEL AGUA**

**PRESENTA:**

**M. EN C. DIANA ROCIO VILLARREAL HERMNÁNDEZ**

**DIRECTORES DE TESIS**

**DR. HÉCTOR MARTÍNEZ VALDÉS**

**CO-DIRECTORES**

**DRA. ARACELI AMAYA CHÁVEZ**

**DR. MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ ALBORES**

Toluca de Lerdo, México, 11 de mayo del 2018

## AGRADECIMIENTOS

A mi Director de tesis, el Dr. Héctor Martínez Valdés por su apoyo, comprensión, guía y por su tiempo brindado en la elaboración de la presente investigación. Muchas gracias.

A la Dra. Araceli Amaya Chávez por compartir sus amplios conocimientos y experiencia en el tema, por estar en todo momento pendiente en la realización de esta investigación y por la disponibilidad de tiempo para dar revisión a la misma.

Al Dr. Miguel Ángel Gómez Albores, Dr. Carlos Díaz Delgado, Dra. Marivel Hernández Téllez y el Dr. Guillermo Pedro Morales Reyes por sus aportes, comentarios, sugerencias y conocimiento brindado.

Quiero expresar mi enorme gratitud al Dr. Carlos Alberto Mastachi Loza y la Dra. Rocío Becerril Piña, por su invaluable apoyo dentro como fuera del terreno académico, así como también por su amistad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por las becas otorgadas durante el posgrado.

Al Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) dependiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, por los apoyos y facilidades otorgados para la realización de mis estudios de posgrado.

Al señor Asunción Tolentino y familia por permitarnos la instalación de equipo de monitoreo en su invernadero, ya que sin ellos no hubiera sido posible la obtención de datos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo del presente trabajo.

A familiares y amigos que han enriquecido mi vida con su afecto y regocijo

## RESUMEN

Conservar el agua limpia siempre en el ambiente, garantiza disponer de buenos ecosistemas aptos para la flora, fauna y los seres humanos, además de que, el agua dulce continental es la principal fuente de suministro de agua potable, de ahí la importancia de proteger este recurso de la contaminación.

Los plaguicidas son compuestos empleados para controlar, disminuir o eliminar plagas que atacan los cultivos. Su adecuada utilización contribuye a elevar la producción de origen agrícola. Sin embargo, dada su constitución, al ser aplicados constantemente en la agricultura generan residuos que contaminan en el suelo, cuerpos de agua, aire y biota, afectando las cadenas tróficas y como consecuencia, a la salud humana.

El destino ambiental de los plaguicidas depende en gran parte de sus propiedades fisicoquímicas, así como de las condiciones ambientales del lugar de donde se aplican, que al final son los dos factores primordiales que determinan su grado de retención, degradación o movilidad a través del suelo, que tan soluble es en el agua y volátil para ser transportado por el aire.

La contaminación por plaguicidas ocurre por una serie de procesos complejos de transporte, volatilización, precipitación pluvial, escurrimientos, lixiviaciones y retenciones, los cuales se ven influenciados por múltiples factores de tipo: climático, geomorfológico, edafológico y antropogénico. Un ejemplo al respecto, el parámetro de vida media de un plaguicida puede ser una medida útil de cuánto tiempo puede permanecer éste en el medio aplicado, sin embargo, estudios realizados han encontrado una amplia variedad de valores de vidas medias para el mismo plaguicida bajo diferentes condiciones ambientales.

Por otro lado, el creciente desarrollo en años recientes de los softwares en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y su uso frecuente para el procesamiento de información espacial y temporal, en las diferentes disciplinas de la investigación, hacen atractiva su aplicación.

El trabajo de investigación realizado tuvo como objetivo hacer un balance de plaguicidas por capas en el perfil de la ZE del suelo de un invernadero de cultivo de flor de forma espacial y temporal a través del software de SIG TerrSet aplicando modelos

**Movilidad de plaguicidas en la zona radicular del cultivo de *Gerbera jamesonii* en invernadero: modelación geomática**

matemáticos, cuyas variables fueron obtenidas en campo, laboratorio y de bibliografía, para obtener estimaciones del destino ambiental de los plaguicidas aplicados durante las actividades agrícolas a nivel de invernadero. La zona de aplicación del estudio, se realizó en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México, México.

**Palabras clave:** ambiente, agua, contaminación, plaguicidas, SIG, modelación hidrogeomática



## ABSTRACT

Keeping water clean always in the environment, guarantees the availability of good ecosystems suitable for flora, fauna and human, in addition to the fact that continental fresh water is the main source of drinking water supply, hence the importance of protecting this Pollution resource.

Pesticides are compounds used to control, reduce or eliminate pests that attack crops. Its proper use contributes to raise the production of agricultural origin. However, given their constitution, when they are applied constantly in agriculture, they generate waste that pollutes the soil, bodies of water, air and biota, affecting the trophic chains and as a consequence human health.

The environmental fate of pesticides depends in large part on their physicochemical properties, as well as on the environmental conditions of the place where they are applied, which in the end are the two main factors that determine their degree of retention, degradation or mobility through the soil. , how soluble it is in water and volatile to be transported by air.

Pollution by pesticides occurs through a series of complex processes of transport, volatilization, rainfall, runoff, leaching and retention, which are influenced by multiple factors of type: climatic, geomorphological, edaphological and anthropogenic. An example in this regard, the half-life parameter of a pesticide can be a useful measure of how long it can remain in the medium applied, however, studies have found a wide variety of half-lives for the same pesticide under different environmental conditions.

On the other hand, the growing development in recent years of software in Geographic Information Systems (GIS) and its frequent use for the processing of spatial and temporal information, in the different disciplines of research, makes its application attractive.

The objective of the research work was to make a balance of pesticides by layers in the profile of the EZ of the soil of a greenhouse of flower cultivation in a spatial and temporal way through the software of GIS TerrSet applying mathematical models, whose variables were obtained in field, laboratory and bibliography, to obtain estimates of the

**Movilidad de plaguicidas en la zona radicular del cultivo de *Gerbera jamesonii* en invernadero: modelación geomática**

environmental fate of pesticides applied during agricultural activities at greenhouse level. The area of application of the study was in the municipality of Villa Guerrero, Estado de Mexico, Mexico.

Keywords: environment, water, pollution, pesticides, GIS, hydrogeomatic modeling

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>II</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>XIII</b>
<b>ABREVIATURAS</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
1.1 Antecedentes	3
1.1.1. Floricultura en México	3
1.1.2. Gerbera	4
1.1.3. Origen de demanda y comercialización de plaguicidas	7
1.1.4. Marco jurídico de plaguicidas en México	7
1.1.5. Situación de los plaguicidas en México	8
1.1.6. Problemática de plaguicidas en la salud	10
1.1.7. Características de algunos plaguicidas frecuentemente empleados en los invernaderos	13
1.1.8. Estudios realizados en el municipio de Villa Guerrero	16
1.1.9. Los SIG en la estimación de la contaminación por plaguicidas	17
1.1.10. Modelación de plaguicidas	18
1.1.11. Trabajos en geomática desarrollados en el CIRA	20
1.2 Justificación	21
1.3 Hipótesis	23
1.4 Objetivos	23
1.4.1. Objetivo general	23
1.4.2. Objetivos específicos	23
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>26</b>
2.1 Plaguicidas	26
2.2 Clasificación de los plaguicidas	27
2.3 Comportamiento de plaguicidas en el suelo y la zona no saturada	29
2.4 Características fisicoquímicas de los plaguicidas y su transporte en el ambiente	35
2.5 Características ambientales de los plaguicidas	35
2.6 Mecanismos de transporte ambiental de los plaguicidas	36

<b>2.7</b>	<b>Influencia de las características del lugar en el transporte de plaguicidas</b>	<b>36</b>
<b>2.8</b>	<b>Factores fisicoquímicos que inciden en el destino de los contaminantes y en el transporte ambiental</b>	<b>37</b>
<b>2.9</b>	<b>Suelo</b>	<b>40</b>
<b>3.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Ubicación geográfica y características climatológicas</b>	<b>47</b>
<b>3.2</b>	<b>Hidrología superficial</b>	<b>49</b>
<b>3.3</b>	<b>Edafología</b>	<b>49</b>
<b>3.4</b>	<b>Geología</b>	<b>51</b>
<b>4.</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Esquema metodológico</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Ubicación del área de estudio para la aplicación</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Ubicación geográfica del área de estudio</b>	<b>55</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Identificación y elección del invernadero</b>	<b>56</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Identificación y elección de plaguicidas empleados en la producción de Gerbera en invernadero.</b>	<b>56</b>
<b>4.4</b>	<b>Criterios de selección de los plaguicidas a estudiar</b>	<b>57</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Análisis de movilidad de plaguicidas en un sistema cerrado</b>	<b>59</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Principales procesos de movilidad de plaguicidas en la ZNS</b>	<b>60</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Balance de plaguicidas en el suelo</b>	<b>62</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Variables requeridas para el balance de plaguicidas</b>	<b>67</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Variables de campo requeridas del área de estudio</b>	<b>69</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>Estudios de campo</b>	<b>91</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Zona de estudio</b>	<b>92</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Análisis de plaguicidas aplicados</b>	<b>100</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Elección de plaguicidas a estudiar</b>	<b>101</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas contemplados para el análisis</b>	<b>102</b>
<b>5.2</b>	<b>Parámetros de suelo obtenidos del invernadero</b>	<b>106</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Análisis granulométrico del suelo</b>	<b>106</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Materia orgánica (MO) del suelo</b>	<b>109</b>
<b>5.2.3</b>	<b>pH del suelo</b>	<b>110</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Densidad aparente</b>	<b>112</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Humedad y temperatura del suelo (sensores)</b>	<b>112</b>

<b>5.3 Condiciones ambientales en el invernadero</b>	<b>114</b>
5.3.1 Temperatura y humedad ambiental	114
5.3.2 Evapotranspiración en el invernadero	115
<b>5.4 Estimación del balance de plaguicidas en la ZE</b>	<b>116</b>
5.4.1 Concentraciones iniciales prevalecientes en el suelo	116
5.4.2 Balance de plaguicidas	118
5.4.2.1 Primera capa del suelo	118
<b>5.5 Análisis de correlación entre parámetros del suelo y las variables del balance</b>	<b>125</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>130</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>133</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>147</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Estructura de la abamectina.....	13
Figura 1.2	Estructura del metomilo.....	14
Figura 1.3	Estructura de la ciromazina.....	15
Figura 1.4	Componentes de la gestión integrada del agua.....	21
Figura 2.1	Esquematación de los perfiles de suelo en la zona no saturada y zona saturada.....	30
Figura 3.1	Localización geográfica de la zona de estudio.....	47
Figura 3.2	Tipos de clima que prevalecen en la zona de estudio.....	48
Figura 3.3	Descripción edafológica de la zona.....	49
Figura 3.4	Textura de suelo presente en la zona.....	50
Figura 4.1	Diagrama de desarrollo experimental del trabajo de investigación.....	52
Figura 4.2	Esquema de análisis para ubicar el área de aplicación del estudio....	53
Figura 4.3	Diagrama general del trabajo de campo.....	54
Figura 4.4	Proceso de clasificación de plaguicidas empleados en invernaderos	56
Figura 4.5	Diagrama para determinar plaguicidas a modelar.....	57
Figura 4.6	Estimación del CIA de plaguicidas empleados en invernaderos.....	58
Figura 4.7	Movilidad de plaguicidas en un sistema cerrado a partir de su aplicación.....	59
Figura 4.8	Diagrama de procesos y movilidad de los plaguicidas en la ZNS.....	60
Figura 4.9	Diagrama de capas para analizar la movilidad de los plaguicidas en la ZE (ZNS).....	61
Figura 4.10	Modelos dinámicos: hídrico y químico de movilidad de plaguicidas en el suelo.....	62
Figura 4.11	Variables requeridas para la movilidad de los plaguicidas en la ZNS..	68
Figura 4.12	Métodos y equipos para determinar las variables de campo.....	69
Figura 4.13	Sensor HOBO U23 Pro v2 instalado en el sitio experimental.....	70
Figura 4.14	Evaporímetro Etagage instalado en el invernadero.....	71
Figura 4.15	Estación meteorológica Watchdog .....	72
Figura 4.16	Ubicación espacial de los equipos colocados en el invernadero de estudio.....	72

Figura 4.17	Distribución espacial de sitios de muestreo.....	75
Figura 4.18	Análisis granulométrico.....	78
Figura 4.19	Clasificación de material fino por la técnica de Bouyoucos.....	79
Figura 4.20	Macromodelo de generación de C (i) E1.....	80
Figura 4.21	Macromodelo de generación de Cx(t)E1.....	81
Figura 4.22	Plaguicida total en capa 1 del suelo.....	81
Figura 4.23	Corrección de la constante de la velocidad de degradación del plaguicida por T y pH.....	82
Figura 4.24	Cálculo del plaguicida degradado.....	82
Figura 4.25	Pérdida del plaguicida por volatilización.....	82
Figura 4.26	Macromodelo de cálculo del coeficiente de adsorción de Freundlic... ..	83
Figura 4.27	Cálculo del plaguicida en solución.....	83
Figura 4.28	Cálculo del plaguicida adsorbido en el suelo.....	83
Figura 4.29	Macromodelo de cálculo de la pérdida de plaguicida lixiviado.....	84
Figura 4.30	Balance del plaguicida en la capa 1 del suelo.....	84
Figura 4.31	Corrección de la constante de la velocidad de degradación por capa (2 a 5).....	85
Figura 4.32	Degradación del plaguicida en las capas del suelo.....	85
Figura 4.33	Cálculo del coeficiente de adsorción Freundlich.....	86
Figura 4.34	Concentración del plaguicida disuelto en solución en el suelo.....	86
Figura 4.35	Plaguicida adsorbido en las capas del suelo.....	87
Figura 4.36	Plaguicida lixiviado a las siguientes capas del suelo.....	87
Figura 4.37	Balance de plaguicida por capa de suelo.....	88
Figura 5.1	Ubicación y distribución espacial de los invernaderos dentro del límite municipal .....	91
Figura 5.2	Imagen compuesta de la red de hidrográfica e invernaderos.....	92
Figura 5.3	Exposición de trabajadores y niños a plaguicidas.....	93
Figura 5.4	Invernaderos visitados con diferentes estructuras.....	94
Figura 5.5	Dimensiones del área de estudio.....	97
Figura 5.6	Magnitud y sentido de pendientes del área de estudio.....	98
Figura 5.7	Imagen en color compuesto de la zona donde se ubica el invernadero 4.....	99
Figura 5.8	Plaguicidas a modelar .....	101
Figura 5.9	Curva granulométrica para calcular el coeficiente curvatura y	

	uniformidad.....	106
Figura 5.10	Triángulo textural para la denominación de un suelo según su textura.....	107
Figura 5.11	Imágenes superficiales de materia orgánica.....	109
Figura 5.12	Imágenes superficiales de cada capa de pH del suelo.....	110
Figura 5.13	Registro del comportamiento de la temperatura del suelo por sensores.....	112
Figura 5.14	Registro del comportamiento de la humedad del suelo por sensores..	112
Figura 5.15	Gráfico del comportamiento de la temperatura vs humedad ambiental.....	113
Figura 5.16	Gráfico del comportamiento de temperatura vs humedad para un día.....	114
Figura 5.17	Gráfico del comportamiento de la evapotranspiración estimada en el invernadero .....	115
Figura 5.18	Concentración del plaguicida antes y después de ser aplicado en el invernadero.....	117
Figura 5.19	Balance de plaguicida en la primera capa: entradas.....	118
Figura 5.20	Balance de plaguicida en la primera capa: salidas.....	118
Figura 5.21	Balance de plaguicida en la segunda capa: entradas.....	119
Figura 5.22	Balance de plaguicida en la segunda capa: salidas. ....	119
Figura 5.23	Balance de plaguicida en la tercera capa: entradas. ....	120
Figura 5.24	Balance de plaguicida en la tercera capa: salidas.....	120
Figura 5.25	Balance de plaguicida en la cuarta capa: entradas. ....	121
Figura 5.26	Balance de plaguicida en la cuarta capa: salidas.....	121
Figura 5.27	Balance de plaguicida en la quinta capa: entradas.....	122
Figura 5.28	Balance de plaguicida en la quinta capa: salidas .....	122
Figura 5.29	Movilidad del endosulfan en la ZE.....	124
Figura 5.30	Gráfica de correlación: MO vs Cd(t)E1. ....	125
Figura 5.31	Gráfica de correlación: MO vs Ca(t)E1 .....	125
Figura 5.32	Gráfica de correlación: MO vs Rs(t)E1.....	126
Figura 5.33	Gráfica de correlación: pH vs Cd(t)E1.....	126
Figura 5.34	Gráfica de correlación: pH vs Ca(t)E1.....	127
Figura 5.35	Gráfica de correlación: pH vs Rs(t)E1.....	127



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Normas y Leyes mexicanas referentes a los plaguicidas.....	8
Tabla 1.2	Plaguicidas prohibidos en México, conforme al DOF.....	9
Tabla 1.3	Plaguicidas prohibidos en otros países y autorizados en México.....	9
Tabla 2.1	Clasificación de la materia orgánica en suelo.....	42
Tabla 2.2	Sistema de clasificación utilizado para desarrollar el coeficiente de impacto ambiental.....	44
Tabla 4.1	Variables requeridas de campo y literatura, para la modelación.....	66
Tabla 5.1	Localización geográfica de invernaderos.....	90
Tabla 5.2	Plaguicidas empleados en el invernadero 1.....	94
Tabla 5.3	Plaguicidas empleados en el invernadero 2.....	95
Tabla 5.4	Plaguicidas empleados en el invernadero 4.....	95
Tabla 5.5	Plaguicidas frecuentemente utilizados en los invernaderos.....	99
Tabla 5.6	Valores del CIA de plaguicidas .....	100
Tabla 5.7	Características de plaguicidas repetitivos.....	101
Tabla 5.8	Valores de las variables requeridas en el modelado endosulfán obtenidas de la bibliografía.....	103
Tabla 5.9	Propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas.....	104
Tabla 5.10	Composición granulométrica del suelo.....	105
Tabla 5.11	Determinación de la clase textural granulométrica.....	106
Tabla 5.12	Determinación de la clase textural Bouyoucos.....	107
Tabla 5.13	Resultados de carbón orgánico contenida en las muestras de suelo...	108
Tabla 5.14	Resultados de materia orgánica contenida en las muestras de suelo..	108
Tabla 5.15	Clasificación de pH.....	109
Tabla 5.16	Resultados de pH obtenido del suelo en cada capa de análisis.....	110
Tabla 5.17	Resultados de densidad aparente en la profundidad del perfil del suelo de estudio .....	111
Tabla 5.18	Resultados del laboratorio del análisis de plaguicidas del perfil del suelo de estudio.....	116
Tabla 5.19	Resumen de las variables de balance por capa: concentraciones medias y porcentajes.....	123

Tabla 5.20 Coeficientes de correlación obtenidas entre MO, pH vs Cd(t), Ca(t), Rs(t) de perfil de la ZE. 128

### ABREVIATURAS

Abreviatura	Descripción
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades)
CIA	Coeficiente de Impacto Ambiental
CICOPLAFEST	Comisión intersecretarial para el control del proceso y uso de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua
CRI	Centro de Recursos Idrisi
DDT	Dicloro Difenil Tricloroetano
DOF	Diario Oficial de la Federación
ECHA	European Chemicals Agency
EPA	Agencia de Protección Ambiental
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización para la alimentación y Agricultura)
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NPCI	National Pesticide Information Center
PAN	Pesticide Database
pH	Potencial de hidrogeno
N	Normalidad
SAGARPA	Secretaria de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SIG	Sistemas de Información Geográfica
ZNS	Zona no saturada
UTM	Universal Transversal Mercator
UAEMex	Universidad Autónoma del Estado de México
%	Porcentaje o tanto por ciento
mo	Materia orgánica
Koc	Coeficiente de partición orgánico
DL <sub>50</sub>	Dosis letal media
CL <sub>50</sub>	Concentración letal 50

Abreviatura	Descripción
$P_p$	Presión de vapor del plaguicida
$P_p'$	Corrección de $P_p$ por cambio de temperatura
$P_w$	Presión de vapor del agua a la temperatura de invernadero.
$M_p$	Peso molecular del plaguicida.
$M_w$	Peso molecular del agua.
$(C_w)_v$	Perdida de agua por evaporación por unidad de superficie.
$\Theta$	Fracción volumétrica de agua en el suelo.
$P$	Densidad aparente del suelo.
$K_f$	Coefficiente de partición sólido/líquido.
$S_w$	Solubilidad del plaguicida en el agua.
$[P]$	Volumen molar del plaguicida
$M_o$	Porcentaje de materia orgánica
$\Theta_r$	Volumen de agua percolado
$\theta''$	Fracción volumétrica de agua en la capa 1
$\lambda''$	Constante de velocidad de degradación corregida por pH
$\Lambda$	Constante de velocidad de degradación de primer orden
$E_a$	Energía de activación de descomposición del plaguicida
$R$	Constante Universal de los gases
$T_m$	Temperatura media diaria del suelo
$T$	Temperatura a la que $\lambda$ fue determinado
$\lambda'$	Constante de velocidad de degradación corregida por temperatura
$pH''$	pH del suelo
$pH$	pH al que fue determinado $\lambda$
$B$	Constante de velocidad por cada unidad que se incrementa el pH
$C'$	Cantidad total del plaguicida en el suelo al principio del día
$PM$	Peso molecular
m.s.n.m	Metros sobre el nivel de mar
$K_d$	Coefficiente de reparto
MHYDAS	Modelization of Hydrology in Agrosystems
HSPF	Hydrological Simulation Program FORTRAN

Movilidad de plaguicidas en la zona radicular del cultivo de *Gerbera jamesonii* en invernadero: modelación geomática

Abreviatura	Descripción
PRZM	Pesticide Root Zone Model
WARMF	Watershed Analysis Risk Management Framework
SWAT	Soil and Water Assessment Tools
AnnAGNPS	Modelo Anual de Contaminación Difusa de Origen Agrícola
PESTAN	Pesticide Analytical
OC	Contenido de carbono orgánico
OMS	Organización Mundial de la Salud
Koc	Coeficiente de partición de carbono orgánico o coeficiente de partición de suelo/agua
kow	Coeficiente de partición octanol-agua
MNA	Modelo numérico de altitud
ADN	Ácido desoxirribonucleico
DBCP	Dibromocloropropano
PAN	Red de Acción de Plaguicidas
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
COFEPRIS	Comisión federal para la protección contra riesgos sanitarios
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
LEGEPEGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
TOXNET	Toxicology data network Red de datos toxicológicos
HCH	Hexaclorociclohexano
EPN	Fenilfosfonotioato de O-etil O-p-nitrofenil
ITESM	Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey
INEGI	Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática

### LISTA DE UNIDADES

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
<sup>0</sup> K	Grados Kelvin	Pascal	Newton/m <sup>2</sup>
<sup>0</sup> C	Grados Centígrados	Milipascales	10 <sup>-3</sup> Pa
kg	Kilogramo	Km	Kilómetro
lb/pulg <sup>2</sup>	Libras por pulgada cuadrada	%	Porcentaje
mm Hg	milímetros de mercurio	g	Gramos
µg/g	Microgramo por gramo	cal/mol	Caloría por mol
mg	Miligramos	ppm	Partes por millón
m	Metro	mg/l	Miligramos por litro
mm	Milímetros	µg/l	Microgramo por litro
cm	Centímetros	ppb	parte por billón
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos	Ha	Hectárea
cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados	cal	Caloría
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados	Newton	kg.m/s <sup>2</sup>
H <sub>C</sub>	Coefficiente de partición aire-agua	µg/cm <sup>3</sup>	Microgramo por centímetro cubico
g/cm <sup>3</sup>	Gramos por centímetros cúbicos	µg/cm <sup>2</sup>	Microgramo por centímetro cuadrado
cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos por centímetros cúbicos	µg/cm <sup>2</sup> día	Microgramo por centímetro cuadrado por día
kg/ha	kilogramo por hectárea	g/cm <sup>2</sup>	Gramos por centímetro cuadrado
mm/cm <sup>2</sup>	Milímetros por centímetro cuadrado	cal/ <sup>0</sup> K mol	Calorías por grados kelvin mol
Pa	Pascal	n mol/ mL	Nanomol/ mililitro
mm	milímetro		

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el uso indiscriminado e incremento de plaguicidas empleados en la agricultura, es una causa importante de degradación de los recursos hídricos (Jes *et al.*, 2012), ocasionando la necesidad de estimar la concentración de contribución de estos contaminantes en el agua superficial y subterránea, recurriendo al uso de modelos matemáticos para la simulación de los procesos de contaminación.

Ronan *et al.* (2012) mencionan que, la modelación en ciencias ambientales es útil para predecir y estudiar, el efecto debido a las actividades humanas o el cambio climático. Lo antes mencionado, ha motivado a realizar más investigaciones en este ramo. Es así, como los modelos de simulación se plantean como herramientas útiles para predecir los efectos de los escenarios de estudio (Sylvain y Caroline, 2012).

Esta investigación tuvo como objetivo principal, estimar la movilidad de plaguicidas en la zona no saturada (edáfica) particularmente en la zona radicular del cultivo de la flor Gerbera, adquiriendo y generando variables a nivel de invernadero requeridos debido al empleo de un modelo matemático para tal propósito a través de un Sistema de Información Geográfica, para así, crear macromodelos que representen las componentes del modelo empleado. El desarrollo del trabajo se realizó en el Laboratorio de hidrogeomática del Centro de Recursos Idrisi (CRI-UAMEX) del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), empleando el software de SIG TerrSet (Eastman, 2016), laboratorio de Modelos Hidráulicos, laboratorio de calidad del agua, laboratorio de edafología de la Facultad de Ciencias Agrícolas y el laboratorio de Facultad de Química.

Para establecer los componentes de la modelación, fue necesario integrar los procesos de la contaminación por plaguicidas en la zona no saturada, esto realizó a nivel de invernadero (contaminación puntual), caracterizando las principales variables que inciden durante la producción de la Gerbera, para posteriormente espacializarlos y temporalizarlos. El invernadero de estudio se ubica en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México, México.

La modelación se realizó en invernadero con el fin de determinar la funcionalidad, para que con base en los resultados generados por éste, efectuar las correcciones y ajustes pertinentes. Al



término de la presente investigación, esta metodología será útil como una herramienta para los tomadores de decisiones, en temas relacionados con la contaminación por plaguicidas en la zona no saturada del suelo.

## **1.1 Antecedentes**

Con el transcurso de los años, el crecimiento demográfico de la población a nivel mundial ha ido en aumento llegando a una cifra aproximada de 7,200 millones hasta enero del 2014 y se espera que en el 2050 habrá aumentado más de 2,000 millones (ONU, 2014), esto ha generado a la par una enorme presión sobre los recursos naturales y una gran demanda en los productos de origen agrícola como: alimentos y ornamentales (flores), por mencionar algunos. Los plaguicidas han representado ser uno de los elementos principales del crecimiento de los sistemas de producción agrícolas. Sin embargo, el incremento de su uso ha dado origen a una creciente preocupación sobre el efecto que ocasionan éstos en el ambiente, ya que se han identificado residuos de plaguicidas en los componentes ambientales (aire, agua y suelo) en diversas regiones geográficas del mundo, incluyendo lugares muy remotos al sitio original de su aplicación o liberación (Gevao y Jones, 2002).

La forma de propagación del destino de los plaguicidas en el ambiente constituyen un proceso muy complejo y que se ven influenciados a factores como: a sus propiedades fisicoquímicas, las prácticas de aplicación, uso y manejo, las condiciones climáticas, las propiedades del suelo y del agua (Spadotto *et al.*, 2002). Por consiguiente, la parte de plaguicida lixiviado que podría llegar al agua subterránea dependerá del tiempo de flujo a través de la zona no saturada (ZNS) y de las propiedades fisicoquímicas de los suelos para retener, retardar o atenuar el movimiento de los plaguicidas (Sanderson y Lowe, 2002).

### **1.1.1. Floricultura en México**

La creciente demanda de productos florícolas ha incrementado el uso de plaguicidas. En México, los principales estados florícolas, considerando su volumen de producción son: Estado de México (53 %), Puebla (23 %), Sinaloa (11 %), Baja California (4 %), Guerrero (3 %), seguidos en menor porcentaje por entidades como: Morelos, Veracruz, Oaxaca, Jalisco, Distrito Federal, Michoacán, Chiapas y Nayarit (SAGARPA, 2006).

Tal como se indica en el párrafo anterior, el Estado de México es el mayor productor de flores a nivel nacional, ya que contribuye con el 85 % de la superficie de invernaderos y el 90 % de superficie florícola a la intemperie. Dentro del Estado de México, el municipio que sobresale en esta actividad es el municipio de Villa Guerrero (INEGI, 2005; ITESM, 2011) y aporta más del 70% de la producción de flor de corte para la exportación. La producción agrícola en el periodo de 2000 a 2011 aumentó a una tasa anual de 9.5 %, para el último año el valor alcanzado fue de 5,646 millones de pesos a nivel nacional. El Estado de México generó 3,341 millones de pesos (59.2 %) y el municipio de Villa Guerrero 1,827 millones de pesos (32.4 %) equivalente a la tercera parte. En el Estado de México se producen diferentes tipos de flores, de las cuales seis generan el 85 % del valor de la producción (Rosa, Crisantemo, Liliom, Clavel, Gerbera y Gladiola) (Disemina, 2012).

### **1.1.2. Gerbera**

La gerbera, es una de las flores más importantes en la floricultura, esta flor en los últimos años ha incrementado su renombre debido a su belleza, color y el tiempo de vida en el florero, por lo que, se ha generado una gran demanda en la industria de las flores. A nivel mundial es uno de los cultivos de la floricultura más importantes, ocupando el cuarto lugar en valor económico (Song *et al.*, 2012).

La *Gerbera jamesonii*, más conocida por su nombre popular gerbera, pertenece a la familia *Asteraceae* y se pueden propagar por semillas o por métodos asexuales (Kanwar y Kumar, 2008). La gerbera lleva el nombre de un naturista alemán Trangott Gerber, aunque fue Scottsman Robert Jameson quien descubrió la especie en 1880, cerca de Barberton en el antiguo Transvaal, en Sudáfrica. Al género de la gerbera pertenecen más de 100 especies distribuidas en siete géneros, la mayoría de ellas de origen africano. La variedades cultivadas en la actualidad para su aprovechamiento comercial tienen su origen en la realización de numerosas hibridaciones, principalmente entre las especies *Gerbera jamesonii* y *Gerbera viridifolia*, ambas procedentes del sur de África (Bañon *et al.*, 1993).

La gerbera, en el año 2004 se encontraba entre los principales cultivos ornamentales en el municipio de el municipio de Villa Guerrero, tenía una superficie cultivada de 25 hectáreas, con

una producción de 230, 000 toneladas y un valor de producción de 49, 450, 000 de pesos (Vargas, 2006).

**Las principales plagas en el cultivo de la flor gerbera** (Infoagro, 2014; Bañon, 2014) **son:**

**Insectos:**

**Minador de hojas (Liriomyzatrifolii):** este es uno de los insectos más problemático en la producción de Gerbera. La larva produce túneles o minas serpenteantes blanquecinas que después se ponen café. Las mayores poblaciones generalmente coinciden con altas temperaturas y ambiente seco. Algunos de los productos utilizados en el combate de las larvas de insectos son: clorpirifos, abamectina, deltametrina, diclorvos.

**Mosca blanca (Trialeurodes vaporariorum, Bemisia tabaci):** es una plaga que en invernadero reduce el vigor de la planta, al chupar la savia, además excreta grandes cantidades de una sustancia dulce que atrae al hongo negro.

**Áfidos:** representan un problema importante en el cultivo de gerbera, principalmente porque sus poblaciones aumentan rápidamente y por consiguiente el combate químico se dificulta, debido a que el insecto se mete dentro de los botones florales por lo que requiere un control a tiempo o eliminar los tallos infectados.

**Ácaros:** la gerbera es atacada por dos familias de ácaros Tetranychidae y Tarsonemidae.

**Tetranychidos o arañas de dos manchas:** su ataque genera clorosis general en las hojas, reduciendo la fotosíntesis y aumentando la transpiración de la planta lo que genera la desecación de la planta. El combate se puede realizar atomizando follaje con los productos indicados como abamectina, monocrotopos.

**Ácaro de ciclamen:** esta familia de los tarsonemidae. La sintomatología de ataque se caracteriza porque las hojas jóvenes sufren un doble hacia el envés, se tornan de un color verde intenso y toman una apariencia de hojas muy gruesas y malformadas; no alcanza su tamaño normal, se reduce la producción y aquellas que se logran desarrollar crecen malformadas e irregulares

**Araña roja (*Tetranychusurticae*):** provoca un aspecto amarillento y puntitos amarillo o pardo en la planta, luego se desecan y caen. Aparecen en ambiente seco y caluroso.

**Trips (*Frankliniellaoccidentalis*):** estos insectos son peligrosos por su periódica aparición y el daño que ocasionan es la extracción de savia, picando la hoja provocando un color plateado o decoloraciones que luego secan o caen.

**Caracoles y babosas (*Tebas sp; Agriolimaxsp.*):** generalmente se encuentran en las hojas, de las que se alimentan, dejándolas cribadas por perforaciones más o menos redondeadas, aparecen habitualmente en épocas húmedas.

### **Requerimientos agroecológicos**

**Ciclo vegetativo:** perenne, intervalo entre cortes, alrededor de los 100 días (Bañón *et al.*, 1993).

**Humedad ambiental:** la gerbera requiere niveles más bien elevados de humedad atmosférica, estando el intervalo óptimo comprendido entre el 70 y 90 %. Para la fecundación se requiere una humedad relativa entre 40 y 50 % (Bañón *et al.*, 1993).

**Temperatura:** las temperaturas ideales para este cultivo son de 15 y 18 °C para la noche y entre 22 y 25 °C para el día. Las condiciones térmicas más favorables para la fecundación son 22-24 °C (Bañón *et al.*, 1993) y (Oszkinis y Lisiecka, 1990).

**Profundidad de suelo:** requiere un suelo con una profundidad mínima de 50-60 cm y con buen drenaje (Bañón *et al.*, 1993).

**Textura de suelo:** prefiere suelos sueltos y ligeros, poco calcáreos (Bañón *et al.*, 1993) con textura franca, franco-arenosa o franco-arcillosa.

**pH:** la gerbera permite un pH entre 5.5 y 7.0 si tiene un pH menor produce marchitamiento, esta flor prospera en suelos medianamente ácidos.

**Drenaje:** requiere suelos con buen drenaje. No tolera encharcamientos, ya que es susceptible a la presencia de enfermedades fungosas (Bañón *et al.*, 1993).

### **1.1.3. Origen de demanda y comercialización de plaguicidas**

Desde hace tiempo, el incremento en la venta y el empleo de plaguicidas están generando daños al ambiente y en la salud humana (Mrema *et al.*, 2013). El aumento en la concentración de plaguicidas en los cauces de agua se debe al uso indiscriminado de éstos en la agricultura, que a su vez son transportados a través del escurrimiento superficial y la lixiviación. La movilidad de los plaguicidas en el ambiente depende de diversos factores físicos químicos y biológicos (Vryzas *et al.*, 2009).

En el mundo, la agricultura es muy importante debido a la demanda de la población de productos de origen agrícola. En México, se tienen más de 20 millones de hectáreas de tierra agrícola de la cual, el 25 % es de riego, mientras que el resto es de temporal (García *et al.*, 2012), lo genera una gran demanda en la adquisición de plaguicidas. Es importante señalar que, la mayor parte de los plaguicidas no se sintetizan con ingredientes activos nuevos; la mayor parte de los ingredientes activos para la formulación de los productos se importa de otros países, la cantidad de plaguicidas formulados en México es mínima, ya que éstos, al igual que los ingredientes activos son importados, por lo que, la evaluación de la peligrosidad de los plaguicidas son realizados en el país de origen.

### **1.1.4. Marco jurídico de plaguicidas en México**

Históricamente, los plaguicidas en México se han encontrado regulados por disposiciones ambientales, fitosanitarias y zoonosanitarias, laborales y de transporte, de manera indirecta de diversas disposiciones aduanales y de comercio exterior, que establecen las disposiciones que deben ser utilizadas en el manejo de plaguicidas. En la tabla 1.1 se muestra la legislación referente al uso y control de los plaguicidas en México.

**Tabla 1.1** Normas y Leyes mexicanas referentes a los plaguicidas.

<b>Tipo de Norma</b>	<b>Norma Oficial Mexicana</b>
Toma de muestra	NOM-AA-105-1988.
Ecológicas	NOM-090-ECOL-1994, NOM-052-ECOL-1993
Sanitarias	NOM-044-SSA1-1993, NOM-045-SSA1-1993, NOM-046-SSA1-1993, Proyecto de NOM-058-SSA1-1993, Proyecto de NOM-043-SSA1-1993
Zoosanitarias	NOM-023-ZOO-1994
Fitosanitarias	NOM-032-FITO-1995, NOM-033-FITO-1995, NOM-034-FITO-1995, NOM-050-FITO-1995, Proyecto de NOM-051-FITO-1995, NOM-053-FITO-1995, NOM-057-FITO-1995
Higiene y Seguridad Industrial	NOM-005-STPS-1993, NOM-006-STPS-1993, NOM-009-STPS-1993, NOM-010-STPS-1993
Transporte	NOM-002-SCT2-1994, NOM-003-SCT2-1994, NOM-004-SCT2-1994, NOM-005-SCT2-1994, NOM-006-SCT2-1994, NOM-007-SCT2-1994, NOM-010-SCT2-1994, NOM-011-SCT2-1994, NOM-019-SCT2-1994, NOM-028-SCT2-1994, NOM-043-SCT2-1995.
LEY GENERAL DE SALUD	ARTÍCULO 194 FRACCIÓN III, ARTÍCULO 204, ARTÍCULO 207, ARTÍCULO 214, ARTÍCULO 278 FRACCIÓN I, ARTÍCULO 279 FRACCIÓN II,III ,IV Y V ARTÍCULO 280, ARTÍCULO 281, ARTÍCULO 282 BIS., ARTÍCULO 298, ARTÍCULO 376.
LGEEPA	ARTÍCULO 120 FRACCIÓN V, ARTÍCULO 134 FRACCIÓN IV Y ARTÍCULO 135 FRACCIÓN IV, ARTÍCULO 143 Y 144
LEGEPEGIR	ARTÍCULO 31 FRACCIÓN IX, ARTÍCULO 67 FRACCIÓN IX

**Fuente:** DOF, Ley General de Salud, 2007, LGEEPA, 2010, LEGEPEGIR, 2007

### 1.1.5. Situación de los plaguicidas en México

En México, el 60 % de los plaguicidas utilizados están considerados como perjudiciales para la salud y el ambiente, de ellos, el 42 % se fabrican en el país. De 90 plaguicidas que han sido eliminados o restringidos en los Estados Unidos, 30 se siguen empleando en México (INEGI, 1992). Los plaguicidas que han sido prohibidos en México se muestran en la tabla 1.2 según el Diario Oficial de la Federación (DOF) (INE, 2012). En el caso de organizaciones civiles como RAPAM han recopilado la información de los plaguicidas prohibidos en otros países y que en México se siguen utilizando los cuales se muestran en la tabla 1.3.

**Tabla 1.2** Plaguicidas prohibidos en México conforme al DOF.

<b>Plaguicidas</b>		
Triamifos	Erbon	DBCP
Mercurio	Formotion	Dialiafor
Acido 2,4,5-T	Scradan	Dieldrin
Aldrin	Fumisel	Dinoseb
Cianofos	Kepone/Clordecone	Endrin
Cloranil	Mirex	Monuron
Nitrofen	HCH	EPN
Paration etílico	Toxafeno	Sulfato de talio
Fluoroacetato de sodio (1080)	Acetato o propionato de fenil	DDT

*Fuente: INE, 2012*

**Tabla 1.3** Plaguicidas prohibidos en otros países y autorizados en México.

<b>Plaguicidas</b>			
Alaclor	Dicofol	Metidación	Paratión Metílico
Aldicarb	Diuron	Metamidofos	Pentaclorofenol
Azinfos Metílico	Endosulfán	Metoxicloro	Quintoceno
Captafol	Forato	Mevinfos	Sulprofos
Carbarilo	Fosfamidon	Monocrotofos	Triazofos
Captan	Kadetrina	Ometoato	Tridemorf
Clordano	Linuron	Oxyfluorfen	Vamidothion
DDT	Maneb	Paraquat	2,4-D

*Fuente: RAPAM, 2015*

### 1.1.6. Problemática de plaguicidas en la salud

El uso, comercialización y la intensificación en la actividad agrícola que va en aumento lo que ha generado una mayor demanda de plaguicidas. Se estima que cada año se utilizan 2.5 millones de toneladas de plaguicidas en todo el mundo y 220,000 mueren a causa de la intoxicación de estas sustancias, y éstas ocurren en su mayoría en países en vías de desarrollo debido a la falta de aplicación de normas en el uso y manejo de plaguicidas, de información de las personas y de equipo de protección (OMS, 1990; Pimentel *et al.*, 1996).

En un estudio realizado en 18 invernaderos de flores en Brasil mediante la realización de entrevista a los trabajadores, encontraron que el síntoma más frecuente que presentan es la cefalea en un 33 % de los individuos, seguido por la comezón o picazón en ojos y manos, la pérdida de la memoria en un 25 %, dolor de pecho, mareo y déficit de atención en un 17 % a pesar de estos datos la mayoría manifestó que ninguno de ellos ha ido al hospital (Ribeiro *et al.*, 2012).

Payán *et al.* (2012) realizaron un estudio en la comunidad de Nextipac, Jalisco, México con trabajadores agrícolas, los cuales fueron divididos en dos grupos, en el primero se encontraron los no expuestos a plaguicidas y en el otro a los expuestos. El grupo expuesto mostró envenenamiento agudo en un 20 % de los casos, entre otros modificaciones en su sistema (digestivo, respiratorio, circulatorio, etc.), por lo que concluyeron que, existen problemas de salud para los trabajadores que están expuestos a plaguicidas en niveles orgánicos y celulares.

Por otro lado, Oliva *et al.* (2005) en Bella Vista, Municipio de Villa Guerrero, Estado de México determinaron el riesgo en la salud humana por la exposición a plaguicidas, donde se utilizaban una gran variedad de compuestos químicos, los resultados obtenidos mostraron casos de personas con cáncer, nacimientos con anencefalia, defunciones y otros padecimientos. Cabe mencionar que, no existían medidas preventivas y tampoco capacitación en el manejo de plaguicidas, la aplicación era generalmente por aspersion. Aunado a esto, en época de lluvias, los plaguicidas pueden ser lixiviados a los mantos freáticos y con ello a los pozos de agua potable, lo que constituye una fuente de contaminación.



En 2007, Hernández *et al.* realizaron una caracterización de intoxicaciones agudas en Tejupilco, Estado de México, identificaron el perfil ocupacional, para esto aplicaron encuestas a 35 individuos con antecedentes de intoxicación aguda por plaguicidas, concluyeron que las intoxicaciones en la mayor parte de la población fueron ocupacionales en su mayoría en el sexo masculino, la vía de intoxicación más frecuente fue la respiratoria, no utilizan equipo de protección y existe una falta de capacitación sobre el manejo y aplicación de plaguicidas. Entre las afectaciones que pueden generar los plaguicidas clasificados según su estructura química son:

**Organofosforados y carbamatos:** básicamente afectan al sistema nervioso. Los organofosforados se absorben rápidamente por las vías respiratorias, por la piel y por medio de la ingestión. Los carbamatos una vez que entra al cuerpo se distribuyen por el torrente sanguíneo (Weiss *et al.*, 2004).

**Los organoclorados:** Pueden afectar el sistema endócrino, son especialmente mutagénicos y cancerígenos, también pueden afectar el sistema nervioso y acumularse en el tejido graso incluyendo el componente graso de la leche materna. Estos plaguicidas se absorben por la piel y los aparatos digestivo y respiratorio (Romero *et al.*, 2000; Kester, 2001)

**Piretroides:** generan alteraciones en el sistema nervioso y el sistema inmunológico.

### **Efectos de los plaguicidas Endosulfán y Metomilo sobre la salud**

Dentro de las afectaciones del endosulfán y metomilo que destaca la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, son las siguientes:

La exposición al endosulfán ocurre principalmente al ingerir alimentos contaminados, aunque también puede ocurrir por contacto con la piel, al respirar aire contaminado o al tomar agua contaminada. Afecta principalmente la función del sistema nervioso. Este plaguicida se ha encontrado en por lo menos 164 de los 1,699 sitios de la Lista de Prioridades Nacionales identificados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA). La exposición a cantidades altas de endosulfán produce hiperactividad y convulsiones, no importando cual sea la ruta de exposición. La intoxicación grave puede causar la muerte (ATSDR, 2013).

Los efectos sobre la salud del endosulfán dependen de la cantidad a la que se está expuesto y a la duración de la exposición. Estos pueden ser a través del contacto, a través del agua, el suelo o alimentos. El principal peligro asociado al plaguicida es la intoxicación por la sobreexposición lo cual puede suceder de forma intencional o accidental. La EPA recomienda que los niveles de sulfato de endosulfán en lagos, ríos y arroyos, no deban de exceder 62 microgramos por litro.

Exposición aguda: Estimulante del sistema nervioso central, provoca incoordinación, dificultad para respirar, náuseas, vómito, diarrea, agitación, convulsiones y pérdida de la conciencia. Exposición crónica: Posibles efectos teratogénicos. En animales expuestos incluyen afectaciones en riñón, hígado, sangre y glándula paratiroidea. Es importante mencionar que, debido a las afectaciones ambientales y de salud que ocasiona el endosulfán ha sido prohibido o en algunos casos se han determinado fechas límite y para su cancelación en 73 países, mientras que en México se sigue utilizando (INE, 2011; COFEPRIS, 2015 y RAPAM, 2015)

En el ambiente: Durante su aplicación puede viajar largas distancias por medio del aire, en suelo la fracción disponible es degradada biológicamente en semanas, la fracción adsorbida a las partículas puede persistir por años y es poco propensa a lixiviarse. Su vida media en el agua es de pocos días, pero su biodegradación puede prolongarse significativamente bajo condiciones anaeróbicas y pH ácido. Muy tóxico para organismos acuáticos, especialmente para los peces. Moderadamente tóxico para las abejas. (INE, 2011; COFEPRIS ,2015).

Por otra parte, el metomilo afecta en los seres humanos el sistema respiratorio, la exposición al plaguicida puede causar dolor de cabeza, contracciones musculares, afectaciones en el sistema nervioso, coma y hasta la muerte. Según estudios realizados por Xiang (2013), llegó a identificar que, el metomilo es un fuerte agente genotóxico en el ADN celular.

Efecto en la salud: Exposición aguda: inhibidor de la colinesterasa. No produce irritación a la piel, irritante ocular severo. Exposición crónica: inhibe la colinesterasa. Efectos al ambiente: Toxicidad: altamente tóxico para aves y mamíferos, de moderada a altamente tóxico para peces y otros organismos acuáticos. Persistencia: moderadamente persistente (INE, 2011; COFEPRIS, 2015).

### 1.1.7. Características de algunos plaguicidas frecuentemente empleados en los invernaderos

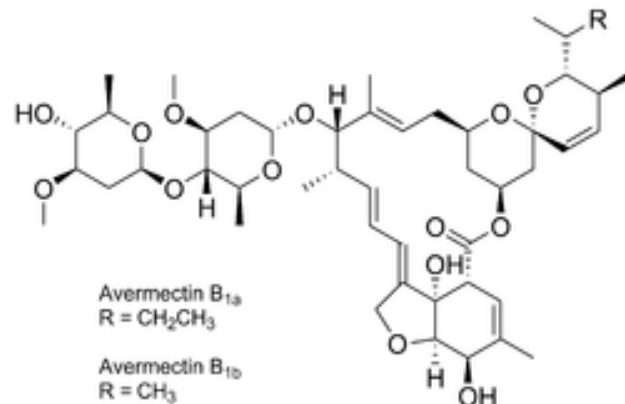
#### Abamectina:

**Uso:** agrícola pecuario, doméstico e industrial.

**Nombre químico:** avermectin B1a y B1b.

**Fórmula:** C<sub>48</sub>H<sub>72</sub>O<sub>14</sub> (B1a) C<sub>47</sub>H<sub>70</sub>O<sub>14</sub>

(B1b)



*Figura 1.1. Estructura de la abamectina*

**Peso molecular:** 873.1 g/mol (Avermectina B1a); 859.1 g/mol (Avermectina B1b)

**DL<sub>50</sub> Oral (mg/kg):** 10 (rata).

**Tipo de plaguicida:** insecticida-acaricida.

**Categoría Toxicológica:** I (extremadamente tóxicos).

**Clasificación:** pentaciclina.

**Riesgos y peligros:** no debe de almacenarse cerca del calor ni acercarse a la flama.

**Exposición aguda:** causa irritación severa a los ojos en forma temporal, ligera irritación en la piel, depresor del sistema central en animales.

**Exposición crónica:** no se han encontrado efectos en los estudios realizados a los animales.

**Efectos al ambiente:**

**Toxicidad:** ligeramente toxico para peces y abejas.

**Persistencia:** poco persistente (hasta 8 semanas). Es rápidamente degradado por los microorganismos del suelo. No es bioacumulable (COFEPRIS, 2013).

**Metomilo:**

**Uso:** agrícola, doméstico, industrial, pecuario y urbano.

**Nombre químico:** S-Metil-N-[(metil carbamoil) oxil] tioacetamidato.

**Fórmula:** C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S

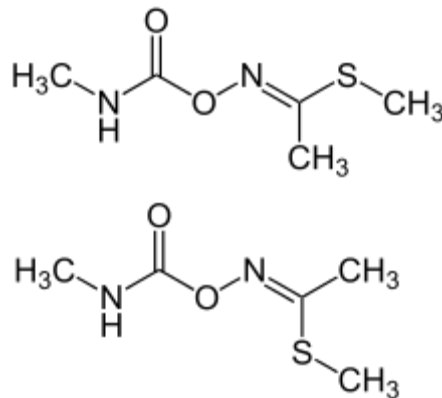
**Peso molecular:** 162.2 g/mol

**DL<sub>50</sub> Oral (mg/kg):** 17 (RATA).

**Tipo de plaguicida:** insecticida.

**Categoría Toxicológica:** II (altamente tóxicos).

**Clasificación:** carbamato.



**Figura 1.2.** Estructura del metomilo

**Riesgos y peligros:** no mezclar con productos de fuerte reacción alcalina, las formulaciones líquidas pueden ser flamables.

**Exposición aguda:** inhibidor de la colinesterasa. No produce irritación a la piel, irritante ocular severo.

**Exposición crónica:** inhibe la colinesterasa.

**Efectos al ambiente:**

**Toxicidad:** altamente tóxico para aves y mamíferos, de moderada a altamente tóxico para peces y otros organismos acuáticos.

**Persistencia:** moderadamente persistente. (COFEPRIS, 2013)

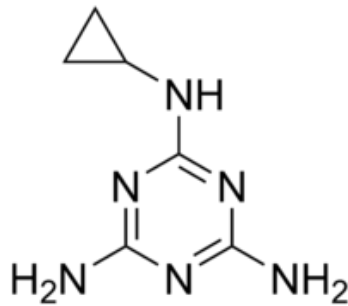
**Ciromazina:**

**Uso:** agrícola.

**Nombre químico:** 2- Cyclopropylamino- 4,6 - diamino- s- triazine

**Fórmula:** C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>N<sub>6</sub>

**Peso molecular:** 166.18 g/mol



**Figura 1.3.** Estructura de la ciromazina

**DL<sub>50</sub> Oral (mg/kg):** >3387 (rata).

**Tipo de plaguicida:** insecticida

**Categoría Toxicológica:** IV (ligeramente tóxicos). (COFEPRIS, 2013)

**Endosulfán:**

**Uso:** agrícola e industrial.

**Nombre químico:** 6,7,8,9,10,10- Hexacloro- 1,5,5a,6,9,9a- Hexahidro- 6,9- metano 2,4,3-benzodioxatíepin - 3- oxido

**Fórmula:** C<sub>9</sub>H<sub>6</sub>Cl<sub>6</sub>O<sub>3</sub>S

**Peso molecular:** 406.96

**DL<sub>50</sub> Oral (mg/kg):** 22.7 (RATA).

**Tipo de plaguicida:** insecticida-acaricida.

**Categoría Toxicológica:** II (altamente tóxicos).

**Clasificación:** organoclorado.

**Riesgos y peligros:** no mezclarse con productos de fuerte reacción alcalina.

**Exposición aguda:** estimulante del sistema nervioso central, provoca incoordinación, dificultad para respirar, náuseas, vómito, diarrea, agitación, convulsiones y pérdida de la conciencia.

**Exposición crónica:** posibles efectos teratogénicos (UM). Efectos en hígado y riñón.

**Efectos al medio ambiente:**

**Destino ambiental:** durante su aplicación es emitido al aire, en el cual puede viajar largas distancias. En el suelo, la fracción disponible es degradada biológicamente en semanas, sin embargo, la fracción adsorbida a las partículas puede persistir por años y es poco propensa a lixiviarse. Su vida media en el agua es de pocos días, pero su biodegradación puede

prolongarse significativamente bajo condiciones anaeróbicas y pH ácido. No se bioacumula, ni biomagnifica a través de la cadena trófica.

**Efectos:** muy tóxico para organismos acuáticos, especialmente para peces. Moderadamente tóxico para abejas. Estudios en laboratorio muestran una toxicidad de alta a moderada en aves. (COFEPRIS, 2013).

### **1.1.8. Estudios realizados en el municipio de Villa Guerrero**

Por lo mencionado anteriormente, en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México, México se han realizado algunos estudios que han permitido, en parte, conocer el empleo y manejo de los plaguicidas, ejemplo de ello es el trabajo de Estrada y Nava (1996) realizado en este municipio, que consistió en hacer mediante el recorrido de tres rutas de muestreo, una recolección de envases vacíos que contenían plaguicidas empleados en la floricultura, los cuales los clasificaron según su composición química, tipo de organismo que controlan y categoría toxicológica, obteniendo los siguientes resultados: para el primer grupo se encontró que los carbamatos fue el grupo químico más utilizado, seguido de los carboximidazoles, organofosforados y benzimidazoles; en el segundo, los fungicidas es el más utilizado, seguido de los insecticidas, insecticidas-acaricidas; para el tercero caso, los plaguicidas ligeramente tóxicos son los más empleados, posteriormente, le siguen los extremadamente y altamente tóxicos y en menor grado, los moderadamente tóxicos.

Estrada (2002) realizó una investigación para determinar los aspectos relacionados con la presencia de plagas y enfermedades del cultivo de Gerbera, para lo cual entrevistó a 53 de un total de 61 productores de Gerbera que existían en el municipio de Villa Guerrero en un periodo de dos años, encontrando que, este cultivo cuenta con un espacio significativo en la región por el gran número de productores que se dedican a este cultivo. El cultivo de la Gerbera es muy susceptible a plagas y enfermedades, debido a que otros cultivos han inoculado o son hospederos de plagas y enfermedades. Las principales plagas detectadas fueron la mosquita blanca, araña roja, trips, pulgones, los cuales son las que causan mayor daño al cultivo.

Bernal (2008) hizo un estudio de caracterización de los suelos empleando el método de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, para identificar los minerales del suelo y definir la existencia de acumulación de plaguicidas en el municipio de Villa Guerrero,

para lo cual, de acuerdo con la clasificación de uso de la tierra, la topografía, la disponibilidad de agua y clima, lo dividió en tres sistemas terrestres: Monte, Villa Guerrero y La Finca. En el sistema terrestre Villa Guerrero, considerado como el de mayor área de uso agrícola para la producción de flores presentó suelos con menor contenido de materia orgánica y con partículas brillantes; donde se identificaron minerales como: sulfito cúprico amoniacal pentahidratado, fosfato sódico de zinc hidratado, cloruro de amonio y tioferrato de potasio de sulfuro de hierro potásico, presentes probablemente por el mayor uso de plaguicidas y fertilizantes inducidos en los suelos florícolas.

### **1.1.9. Los SIG en la estimación de la contaminación por plaguicidas**

Para la implementación de una modelación espacial y temporal, actualmente se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales se han vuelto una herramienta cada vez más indispensables ya que son muy útiles durante el procesamiento de la información, almacenamiento, transformación e integración de las bases de datos, como datos de teledetección, que consiste en obtener información a partir de dispositivos instalados en satélites que orbitan sobre la tierra sin estar en contacto con el objeto (Georges *et al.*, 2011). Por lo que, resulta factible la aplicación de los SIG en trabajos de investigación, ya que permiten modelar el comportamiento de los contaminantes en una cuenca a partir de las variables requeridas por los modelos matemáticos empleados para la simulación y estimación.

El empleo de un SIG obedece a su flexibilidad pues permite tener múltiples aplicaciones en diferentes ramas de la ciencia. Es por esto que, desde hace un tiempo se ha estado utilizando para analizar el movimiento de los plaguicidas, ya que se pueden generar mapas y facilitan el modo de añadir nuevas capas. Es así como Kaminska *et al.* (2004) exponen algunos trabajos en los cuales ha sido importante el uso del SIG como instrumento para supervisar y analizar la contaminación de plaguicidas, como el de Dabrowski *et al.* (2002) donde utilizaron un modelo en un SIG para predecir la escorrentía y relacionarla con la pérdida de plaguicidas de la subcuencas del río Lourens (Sudafrica), determinando que, la escorrentía es la principal causa del transporte de plaguicidas a las aguas superficiales en las zonas rurales.

En otro estudio, se evaluó el potencial de contaminación de agua subterránea por plaguicidas utilizando un SIG (Thapinta *et al.*, 2003), en el cual éste resultó ser una herramienta muy útil

para estimar los índices de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de acuíferos de gran magnitud. Zhang *et al.* (2008) utilizaron los SIG para identificar áreas con alto potencial de escurrimiento con plaguicidas durante la temporada lluviosa, el objetivo de su modelo fue investigar las variaciones del movimiento del plaguicida fuera de sitio de las tierras agrícolas en una cuenca. Cornelis *et al.* (2009) desarrollaron indicadores a través de un SIG para determinar la exposición a plaguicidas y las causas posibles de cáncer de vejiga en la provincia de Limburgo, Bélgica. Pistocchi (2009) realizó la detección de plaguicidas de la siguiente manera, con la información accesible y el modelado en el SIG, estimó la distribución espacial de concentraciones químicas y flujos, mediante la construcción de mapas de detección de concentración de los plaguicidas.

Ramos (2006) realizó en su trabajo de investigación una simulación de la dispersión de plaguicidas utilizando geoestadística aplicada por medio del método de Kriging en el software de representación Surfer. Para ello, primero recopiló treinta muestras de suelo en una parcela en el municipio de Tenancingo, con los cuales estimó la presencia de compuestos químicos organofosforados y carbamatos en la superficie de terreno y con estos valores obtenidos realizó las simulaciones. Por otro lado, Velázquez (2013) a partir de un estudio exploratorio desarrollado en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México, basado en la estimación de los índices de riesgo sobre el ambiente de los grupos de plaguicidas más ampliamente usados en la zona florícola de Villa Guerrero, utilizó los datos generados de este estudio para realizar la identificación de las zonas florícolas vulnerables a la migración de plaguicidas organofosforados y carbamicos, mediante el uso del modelo de simulación de transporte de sustancias orgánicas a través del suelo desarrollado en el software PESTAN (Pesticide Analytical).

Con estos antecedentes, se identifica que, a pesar de que existen estudios de investigación en esta zona sobre plaguicidas a través de la modelación, no hay uno que emplee un modelo hidrogeomático que incluya fórmulas matemáticas que se puedan implementar para reproducir los procesos de movilidad de los plaguicidas en la zona no saturada (edáfica) y que genere de forma espacial imágenes de superficie.

#### **1.1.10. Modelación de plaguicidas**



Una serie de modelos se han desarrollado en los últimos años para estimar el comportamiento de los procesos de contaminación o de efectos de fenómenos naturales así como para predecir cambios futuros. El modelado puede utilizarse para estimar o predecir la magnitud y la gravedad de un problema y cuando éste es aceptado proporciona confianza, facilita la evidencia necesaria para cambiar el comportamiento individual o colectivo (Krueger *et al.*, 2012).

La problemática actual de los plaguicidas ha generado preocupación en la sociedad. Sin embargo, la cantidad de información generada de estudios sobre su comportamiento en el ambiente han permitido el empleo de modelos matemáticos, mientras que, el avance de la tecnología con lo que respecta a desarrollos de programas informáticos han generado el auge del uso de la modelación de plaguicidas, que permiten mejorar la comprensión de su destino y dinámica en el ambiente y respectivamente, suelen ser un instrumento en la toma de decisiones en materia de evaluación y gestión de riesgos (Ghafoor *et al.*, 2011).

Actualmente, ha sido importante utilizar modelos ya implementados en software de SIG que permitan tomar decisiones debido a la contaminación por plaguicidas y para entender los diferentes procesos que ocurren en su dinámica. Como se sabe, la dinámica de los plaguicidas en el ambiente, son regidos por procesos hidrológicos, físico-químicos y microbiológicos, que varían en el tiempo y el espacio. El flujo de los plaguicidas en una cuenca es a través del agua de escorrentía y a las características hidrológicas e hidráulicas de captación. Por lo anterior, es como se han desarrollado diversos modelos matemáticos para la simulación de los procesos de transporte de plaguicidas a través del ambiente. El modelo definido por Sylvain y Caroline (2012), representa de forma simplificada un sistema y el funcionamiento de cómo se debe de realizar una relación entre modelos hidrológicos con el transporte de plaguicidas en el ciclo del agua y el destino final de éstos.

El modelo AnnAGNPS (Modelo Anual de Contaminación Difusa de Origen Agrícola) que además simula la generación de escorrentía, fue utilizado (Aguilar y Polo, 2005) para determinar las aportaciones de plaguicidas en el agua de escorrentía y los flujos asociados a los sedimentos. Wohlfahrt *et al.* (2010) utilizaron el modelo hidrológico MHYDAS que toma en cuenta las prácticas agrícolas y su impacto en la calidad de agua respecto a la contaminación por plaguicidas dentro de una cuenca pequeña de 1 km<sup>2</sup>. Yuzhou y Minghua (2010) utilizaron el modelo PRZM, el cual es un modelo de transporte de plaguicidas a escala de campo, para

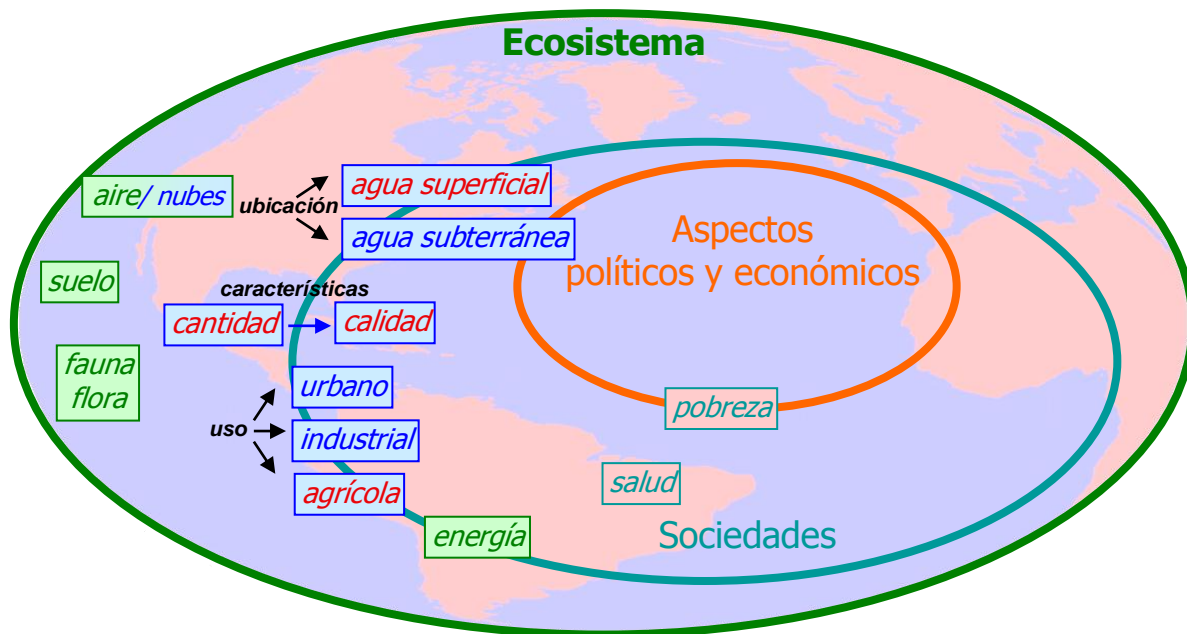
simular el uso de clorpirifos durante el periodo 2003-2007, los resultados mostraron una fuerte evidencia de que el escurrimiento superficial y el tiempo de aplicación, son dos factores que influyen en la variabilidad espacial y temporal de clorpirifos en los campos agrícolas.

Algunos modelos ambientales se han desarrollado para predecir los impactos ambientales asociados al agua subterránea y superficial, contaminada por plaguicidas a escala de cuenca y parcela. Entre los modelos a nivel de parcela están: EPIC, D RAINMOD, HYDRUS, LEACHP y PRZM, a nivel de cuenca son: AGNPS, HSPF, SWAT y WARMF. Sin embargo, hasta ahora existen pocos estudios relacionados con el empleo de los SIG en México, en los cuales se hayan empleado la modelación hidrogeomática para estimar la contaminación por plaguicidas en el agua superficial a nivel de cuenca. Algunos investigadores como Sylvain y Caroline (2012), han estudiado modelos empleados para el análisis y comparación del destino de los plaguicidas tales como: MIKE SHE ADM (Bruyn *et al.*, 2006), SWAT (Holvoet *et al.*, 2005; 2008), GR5-pesticides, SWAT (Madier, 2007) y SACADEU (Gascuel-Odux *et al.*, 2009).

#### **1.1.11. Trabajos en geomática desarrollados en el CIRA**

Con el firme propósito de ir conjuntando los elementos requeridos de los componentes de la gestión integrada del agua por el claustro del CIRA y particularmente, por el Cuerpo Académico de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), se han ido realizando a través de trabajos de investigaciones de tesis de Maestría y Doctorado. A continuación se mencionan sólo algunas investigaciones pioneras en esta área: Gómez (2005) desarrolló una metodología en un SIG para evaluar por subcuenca los indicadores de deficiencias en el tratamiento del agua residual. Manzano (2007) diseñó una base de geodatos censales demográficos en el que él desarrolló e implemento de un módulo geomático para calcular indicadores e índices hídricos de forma automatizada. Franco (2008) desarrolló un módulo hidrogeomático y su implementación para poder evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos que se encuentran en una cuenca. Martínez (2010) desarrolló una metodología hidrogeomática para estimar la contaminación difusa que ingresa a los cuerpos de agua superficial a nivel de cuenca.

La figura 1.4 describe los elementos de las componentes de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), donde se muestran los principales factores naturales que se relacionan e interactúan con los recursos hídricos superficiales y subterráneos.



**Figura 1.4.** Componentes de la gestión integrada del agua (CRI, 2017).

## 1.2 Justificación

La agricultura es una de las principales actividades del ser humano, que ha intensificado su producción en los últimos años debido a la gran demanda de sus productos, como consecuencia del crecimiento acelerado de la población, ocasionando paralelamente el empleo indiscriminado de una gran cantidad de plaguicidas a escala mundial con el propósito de mejorar la productividad agrícola. Esta actividad ha traído consigo, grandes problemas de contaminación al ambiente y subsecuentemente, la degradación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

Actualmente, en el municipio de Villa Guerrero en el Estado de México, México, se realiza una fuerte producción florícola, siendo una de las principales actividades de los habitantes de la región. En el 2010 la zona tenía 5,032 hectáreas de superficie total sembrada y de las cuales 1693 hectáreas era cultivo de temporal y 3339 de riego (SAGARPA, 2013).

Los sitios donde se practican las actividades florícolas se caracterizan por el abundante empleo de plaguicidas, tanto a la intemperie (sistema abierto) como en invernaderos (sistema cerrado).

Sin embargo, está bien estudiado que, su empleo conlleva diversos riesgos, a la salud de las personas ocupacionalmente expuestas, al ambiente y a la población en general.

Los niños, son una población vulnerable importante ya que apoyan en actividades florícolas durante la fumigación, corte y acarreo de la flor (Oviedo, 2013). Los plaguicidas al ser aplicados no solo llegan al organismo blanco sino se distribuye en flora y fauna, suelo, cuerpos de agua superficial y subterránea, éstos últimos mediante los procesos del ciclo hidrológico.

El municipio de Villa Guerrero, está rodeado de un sistema montañoso, lo que propicia las condiciones que contribuyen sustancialmente a la permanencia de estas sustancias químicas en la atmósfera, suelo, agua y biota. Situación que, aunada a la falta de una cultura de prevención de riesgos por la comunidad debido al empleo y manejo de plaguicidas.

La contaminación por plaguicidas en el agua que se lixivia en los suelos agrícolas puede ser responsable del deterioro de la calidad de los cuerpos y fuentes de agua, de la inhibición del desarrollo de flora y fauna (Garibay, 2006) y además, de problemas de disposición de agua para consumo humano.

Debido a lo anteriormente señalado, se ve la necesidad del uso de herramientas o instrumentos que permitan generar un modelo de simulación para predecir eficientemente la cantidad de plaguicidas en la zona no saturada en las áreas de cultivo, para que de esta forma, se genere información que permitan conocer la situación del recurso hídrico de la zona de estudio.

Por otro lado, con el transcurso del tiempo, la tecnología relacionada con la informática y en especial con lo que respecta a los SIG, han tenido un enorme desarrollo en los últimos años. Lo que ha permitido que, desde hace algunos años diversas disciplinas relacionadas con los múltiples campos de la investigación se apoyen cada vez más en éstos, acorde a su campo de estudio. Sin duda, el empleo de un software de SIG para estimar el grado de contaminación por plaguicidas en el agua superficial y subterránea, de una cuenca, acuífero y a nivel de invernadero, resulta hoy en día una herramienta indispensable, esto debido a que, permite especializar y temporalizar a través de imágenes, la distribución de los contaminantes en un área de estudio.

Esta investigación propone desarrollar una modelación hidrogeomática a través del software de SIG TerrSet, que permita estimar el proceso de movilidad de la contaminación puntual en el suelo de la zona radicular, por plaguicidas aplicados en los cultivos de flor (*Gerbera jamesonii*) en invernadero, de forma espacial y temporal. Para ello, se aplican ecuaciones que describen los principales procesos que ocurren durante la movilidad de estos contaminantes, partiendo de la cantidad de plaguicidas aplicada en el cultivo de la flor.

El desarrollo de esta modelación permitirá simular los procesos de movilidad de forma espacial y temporal en la zona radicular de cultivo de Gerbera. Para poder llevar a cabo lo anteriormente señalado, será necesario apoyarse en parámetros obtenidos en campo del área de estudio. Lo que generaría información básica para establecer una estrategia de control. Lo que permitirá orientar la toma de decisiones en cuestión de la gestión del uso de plaguicidas para el cultivo de flor, además de que, pueda ser aplicable en cualquier otro invernadero.

### **1.3 Hipótesis**

La modelación hidrogeomática a través del SIG TerrSet a partir de la caracterización espacial y temporal de plaguicidas empleados en un invernadero, permitirá estimar su movilidad en la zona radicular del cultivo.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Desarrollar una modelación hidrogeomática empleando el software de SIG TerrSet para estimar la movilidad espacial y temporal de plaguicidas en la zona radicular del cultivo de flor **Gerbera (*Gerbera jamesonii*)** de un invernadero, en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México, México.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Recopilar y analizar la información disponible, relacionada con el área de estudio y de los plaguicidas empleados en el cultivo de **Gerbera** en invernadero a través de la revisión bibliográfica disponible para sustentar el trabajo de investigación.
- Elegir un plaguicida a estudiar en función de su toxicidad, persistencia en el medio y sus propiedades fisicoquímicas, para emplearse en la modelación hidrogeomática.
- Aplicar ecuaciones de balance de plaguicidas que consideren las principales variables que describen los procesos de movilidad de estos para el estudio de análisis.
- Efectuar la modelación hidrogeomática en el SIG TerrSet para estimar la movilidad del plaguicida de forma espacial y temporal en la zona radicular del cultivo.
- Analizar los resultados de la modelación basados en los parámetros del suelo que determinan la movilidad de los plaguicidas en la ZE con el fin de explicar su funcionalidad.

# **CAPÍTULO 2**

**MARCO TEÓRICO**

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Plaguicidas

La agricultura es una actividad básica para la supervivencia del ser humano desde tiempos remotos, se ha ido intensificando con la aplicación de nuevos productos de plaguicidas para mejorar la productividad. Los plaguicidas son definidos por la FAO (2012) como: cualquier sustancia destinada a combatir cualquier plaga, para mejorar la productividad agrícola y control de vectores de enfermedades. En tanto que, la EPA (2012) define plaguicida como, cualquier sustancia o mezcla de sustancias que tienen el propósito de prevenir, destruir, repeler o mitigar cualquier tipo de plaga animal o vegetal. El término plaguicida incluye los diferentes tipos de clasificación por ejemplo los basados en el organismo que controlan: herbicidas, insecticidas, acaricidas, etc. Una de las características favorables de los plaguicidas para los agricultores es la facilidad y rapidez de aplicación (Anzalone y Silva, 2010).

La creciente demanda del empleo de plaguicidas para combatir las plagas que afectan a la agricultura, animales, a los seres humanos y hogares, ha conllevado al uso excesivo de éstos, generando no sólo daños al ser humano sino también al ambiente y a los seres vivos. Cabe mencionar que, la importancia de los plaguicidas radica en que destruyen o controlan el número de plagas nocivas en los cultivos, combate plagas de animales que dañan las cosechas, así como también estimula o inhibe el proceso de crecimiento de las plantas, combate algas, bacterias, hongos y malas hierbas (Jolanta *et al.*, 2011).

La propagación de plaguicidas que son utilizados para eliminar o controlar las plagas que afectan a los cultivos, son un problema latente en la actualidad, ya que constituyen uno de los factores de contaminación ambiental, amenazando a la salud humana y a los ecosistemas locales de una zona, debido a su alto grado de toxicidad, bioacumulación y a su naturaleza



persistente en el ambiente. Otros factores como: su movilidad, volatilización, retención y deposición, están relacionados con la lluvia, provocando la contaminación del agua superficial y subterránea, primero por el transporte a través de las redes de drenaje por escurrimiento y segundo, por lixiviación, los cuales en conjunto, son fuente de abastecimiento de agua de todo ser vivo (Koji *et al.*, 2012; Kurasamy *et al.*, 2012; Hua Pan *et al.*, 2012; González *et al.*, 2012).

## **2.2 Clasificación de los plaguicidas**

En los últimos años, se ha prestado especial atención a los procesos de contaminación del agua superficial y subterránea ligados a la utilización de plaguicidas en las prácticas agrícolas. Se tiene información relativa a su presencia en los acuíferos pero existen lagunas de conocimiento sobre los mecanismos de migración e interacción en el medio no saturado (García y Rodríguez, 2012). Esta carencia es más notable en el comportamiento de los plaguicidas, debido a que son sustancias químicamente más complejas, implicadas en procesos de transformación y degradación poco conocidos. Sin duda, la escasez de conocimientos sobre contenidos de plaguicidas en agua es debido a la extraordinaria dificultad para la identificación y cuantificación de estos compuestos y de los productos de degradación originados a lo largo de su tránsito por la zona no saturada (ZNS) del suelo (Koji *et al.*, 2012).

La elevada toxicidad de la mayoría de los plaguicidas y de algunos de sus subproductos, aconsejan con urgencia, el estudio de esta problemática que puede tener graves efectos sobre los seres vivos. De hecho, los organismos e instituciones responsables de la conservación del ambiente y de la salud pública, asumen el control de plaguicidas en agua, alimentos y exposición dérmica (aire) y partículas (Morell y Candela, 1998).

Las dos características más importantes que controlan la migración de plaguicidas en agua y suelos, son su solubilidad y persistencia. Los plaguicidas deben ser lo suficientemente móviles como para alcanzar su objetivo y lo suficientemente persistentes como para eliminar al organismo atacado. Estas dos cualidades no son deseables desde un punto de vista ambiental. Por ejemplo, el DDT tiene muy baja movilidad pero alta persistencia. De ahí que no afecta al agua subterránea, pero tiene alto potencial para biomagnificarse a través de la cadena alimentaria en aire y aguas superficiales (Morell y Candela, 1998).

Desde el punto de vista de su composición química y estructura molecular, existen una gran variedad de plaguicidas, que se clasifican debido al (CICOPLAFEST, 2004; FAO, 2012):

**Organismo que controlan:**

- a) **Insecticida:** Control de insectos
- b) **Acaricida:** Control de ácaros
- c) **Fungicida:** Control de hongos y levaduras
- d) **Bactericida:** Control de bacterias
- e) **Antibiótico:** Control de bacterias
- f) **Herbicida:** Control de hierba y maleza
- g) **Rodenticida:** Control de roedores
- h) **Molusquicida:** Control de moluscos

**Composición química:**

- a) **Compuestos inorgánicos:** Estos son compuestos que carecen de carbono.
- b) **Compuestos orgánicos:** Son aquellos que contienen átomos de carbono en su estructura química, la mayoría son de origen sintético, fabricados a partir de compuestos químicos básicos; algunos son extraídos de plantas, por lo que se conocen como botánicos. Los compuestos orgánicos sintéticos utilizados como plaguicidas pertenecen a distintos grupos o familias químicas. Cada uno de estos grupos tiene algunas características comunes y en cualquiera de ellos puede haber insecticidas, acaricidas, herbicidas, fungicidas u otros tipos de plaguicidas.
- c) **Plaguicidas biológicos:** Se llama así a los virus, microorganismos o sus metabolitos, formulados como insumos, que pueden controlar a una plaga en particular.

**Estructura química:**

- a) Organoclorados
- b) Organosulfurados
- c) Organofosforados
- d) Carbamatos
- e) Piretinas y petroides
- f) Entre otros

## Toxicidad de los plaguicidas

Por mucho tiempo se ha intentado desarrollar un sistema práctico para evaluar la toxicidad aguda y crónica de las sustancias químicas, incluyendo a los plaguicidas. El método más comúnmente empleado y avalado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para medir la toxicidad es la Dosis Letal 50 ( $DL_{50}$ ), que se define como la cantidad mínima de una sustancia, generalmente expresada en mg/kg, que es capaz de matar al 50 % de una población de animales de prueba. Los resultados de  $DL_{50}$  obtenidos para una sustancia dada se extrapolan a los humanos y sirven de base para los sistemas de clasificación de la toxicidad. En el catálogo de plaguicidas de la CICOPLAFEST se ha adoptado la clasificación de toxicidad recomendada por la OMS, con base en la  $DL_{50}$  obtenida en ratas cuando el plaguicida se administra por vía oral en forma aguda y es la siguiente:

- a) I Extremadamente tóxicos
- b) II Altamente tóxicos
- c) III Moderadamente tóxicos
- d) IV Ligeramente tóxicos.

### 2.3 Comportamiento de plaguicidas en el suelo y la zona no saturada

La zona no saturada (ZNS) es el medio por el cual los contaminantes de la superficie de suelo pueden llegar a contaminar el agua subterránea, esta zona puede afectar el transporte de solutos ya que actúa como un depósito dinámico para los contaminantes (Baran *et al.*, 2007), es la zona donde ocurren los procesos físicos, químicos y biológicos actúan de manera más activa, constituye la primera barrera en la que se encuentran los contaminantes en su paso hacia las aguas subterráneas, se considera uno de los factores de protección del agua subterránea (Morell y Fagundo, 1996).

Entre los principales factores de la contaminación del agua por plaguicidas se encuentran la solubilidad, la resistencia a la degradación física y bioquímica, el tipo de suelo y la intensidad de la lluvia (Tarazona *et al.*, 2003).

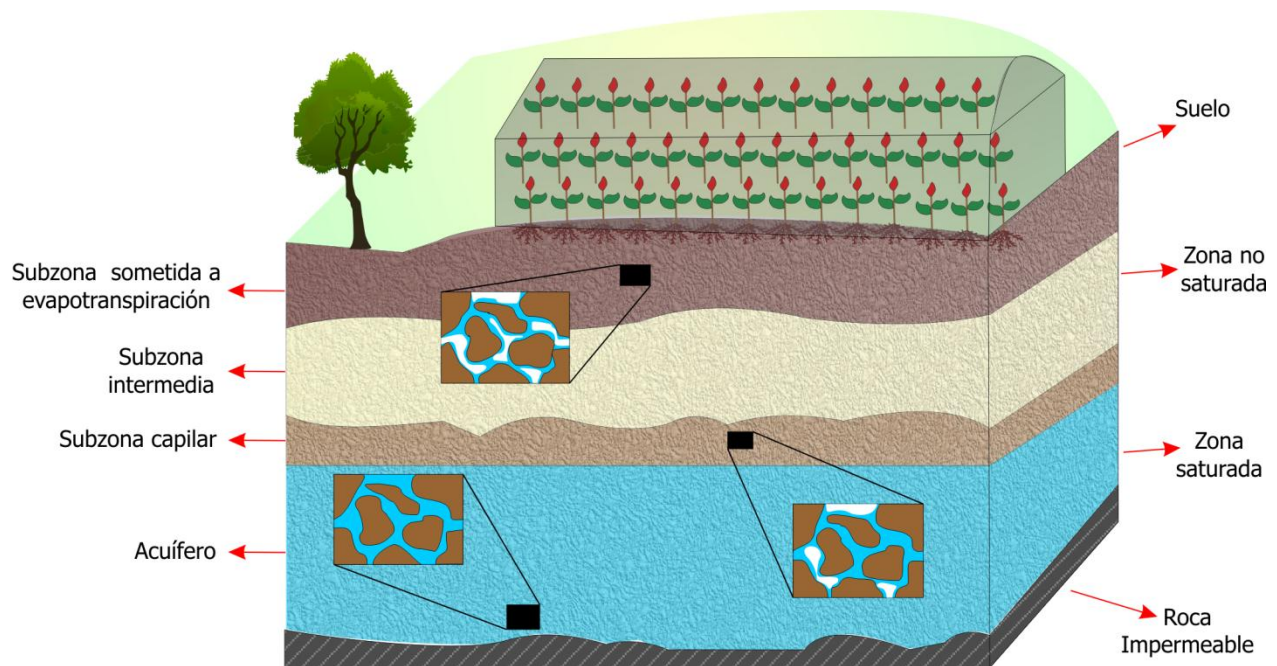
### Subzonas de la ZNS

En la ZNS existen tres subzonas: Subzona sometida a evapotranspiración, Subzona intermedia, subzona capilar (López *et al.*, 1992; Varela, 1993):

**Subzona sometida a evapotranspiración:** comprendida entre la superficie del terreno y los extremos radiculares de la vegetación. Cuando no hay vegetación puede tener un espesor muy pequeño entre 8 y 15 cm y si la hay puede alcanzar profundidades de hasta 3 ó 4 m. Se caracteriza por sus interrelaciones con la atmosfera, a través de la evaporación, convección y transpiración de las plantas. En esta zona es donde se da la mayor parte de la absorción de agua y nutrientes por parte de los vegetales.

**Subzona intermedia:** de características totalmente similares a la anterior, está situada debajo de ella y al no estar afectada por las raíces de las plantas es más compacta.

**Subzona capilar:** es la de transición a la zona saturada propiamente dicha y alcanza una altura sobre la superficie freática que depende de las fuerzas capilares. Su parte inferior está también saturada. El límite superior de la subzona capilar con la subzona intermedia puede estar muy definido o ser apenas perceptible, según el tipo de materiales del suelo.



**Figura 2.1** Esquematización de los perfiles de suelo en la ZNS y ZS (elaboración propia).

En la ZNS los poros del suelo están ocupados por cantidades variables de agua y aire. En general, los poros de mayor tamaño confieren al terreno sus características de permeabilidad y aireación y los poros de menor tamaño son los responsables de la capacidad de retención de agua. Al coexistir agua y aire en los poros del suelo, el concepto y magnitud de la porosidad no son suficientes para expresar el estado de humedad del mismo en un momento dado, por lo que se precisa otro parámetro, contenido volumétrico de agua ( $\Theta$ ) ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) en el suelo (grado de humedad). Los valores de  $\Theta$  están comprendidos entre cero, correspondiente a un suelo totalmente seco y un máximo de saturación ( $\Phi$ ), cuando todos los poros están ocupados por el agua (Morell y Candela, 1993).

Los componentes básicos del potencial del agua (energía por unidad de masa) en el suelo son: potencial gravitacional, potencial de presión, y potencial osmótico. El potencial osmótico es el originado por la atracción iónica de solutos por el agua. El potencial gravitacional es la energía resultante de la fuerza de gravedad actuando sobre el agua en un punto determinado.

El potencial de presión equivale a la energía potencial debida a las fuerzas generadas entre la matriz del suelo y el agua por la acción combinada de tensión superficial, atracción molecular e

intercambio iónico. A diferencia de la situación en la zona saturada, en donde este componente del potencial equivale al peso de la columna de agua y tiene un valor positivo, en la ZNS presenta valores negativos, aunque por convención se expresa con magnitudes positivas y se denomina habitualmente succión capilar o tensión matricial.

La mayor parte de los plaguicidas, una vez aplicados, sufren procesos de degradación y transformación, total o parcial, que conducen a la formación de nuevos productos que, en ocasiones, pueden ser más móviles, persistentes y peligrosos que los compuestos de partida. Cuando se aplica un plaguicida se produce un depósito en la planta que es eliminado progresivamente, con mayor o menor rapidez, en función de factores tales como la tasa de crecimiento del vegetal, condiciones ambientales (viento y lluvia), propiedades físico-químicas del plaguicida (volatilización y solubilidad) y degradación química, que puede ocurrir en el interior de la planta (para los plaguicidas con poder penetrante) o en la superficie de la misma, en cuyo caso juega un papel fundamental la radiación solar (Morell y Candela, 1998).

El fenómeno de lixiviación de los plaguicidas hacia los acuíferos es un fenómeno complejo en el que intervienen numerosos procesos que ocurren tanto en la capa edáfica (en la que existe gran actividad biológica) como en la zona no saturada (ZNS). Estos procesos se resumen fundamentalmente en la: sorción, degradación y volatilización.

La solubilidad en el agua es el primer factor a considerar en el proceso de lixiviado de los plaguicidas. La mayoría de los plaguicidas químicos son sustancias de bajo peso molecular y poco solubles en agua (son más solubles los iónicos que los no iónicos, y más los catiónicos que los aniónicos). Así pues, los compuestos organoclorados son poco solubles en agua debido a su carácter apolar, los organofosforados son, en general, más solubles y los herbicidas ácidos son los menos solubles (Morell y Hernández, 2002).

La volatilización consiste en el flujo del compuesto hacia la fase aire y supone uno de los mecanismos de pérdida de masa hacia la atmósfera. Este proceso está regido por la ley de Henry que establece que su mayor o menor intensidad de volatilidad depende de la presión de vapor del compuesto, de manera que los compuestos con alta presión de vapor tenderán a volatilizarse, excepto que también sean muy solubles en agua. En algunos casos se pueden esperar pérdidas por volatilización de hasta un 90 % en un periodo de 48 horas. Además de la

presión de vapor, este proceso está influenciado por la distribución de los residuos y el nivel de humedad del suelo o superficie de las plantas (Morell y Hernández, 2002).

Asimismo, las condiciones climáticas, especialmente viento y temperatura, influyen notablemente en el grado de volatilización del plaguicida. En general, se puede decir que los compuestos con baja solubilidad y alta presión de vapor difícilmente contaminarán las aguas subterráneas, pero existen otros factores que determinan la movilidad y persistencia de los plaguicidas y que influyen sobre los mecanismos de adsorción y degradación.

La retención del plaguicida debido a la adsorción en el suelo, afecta a la cantidad total de este presente en el suelo ya que puede disminuir e incluso eliminar la cantidad disponible para el transporte. La mayor o menor capacidad de ser adsorbido por la fracción sólida del suelo, esencialmente por las arcillas y la materia orgánica, determina su movilidad en la solución intersticial y puede ser expresada por el coeficiente de reparto ( $K_d$ ). Para describir los procesos de adsorción que tienen lugar en el suelo, se utiliza como primera aproximación la isoterma lineal: la concentración de la fase adsorbida ( $S$ ) (mg/kg) se supone que presenta una correlación lineal con la concentración en la fase acuosa ( $C$ ) (mg/l). Se define el coeficiente de adsorción como  $K_d$  (l/kg) =  $S/C$ , que es independiente de la concentración. Para un mismo plaguicida en distintos suelos, el valor de  $K_d$  puede presentar variaciones de varios órdenes de magnitud en función de las propiedades fisicoquímicas del plaguicida y suelo y de la composición química del suelo (Morell y Candela, 1998).

Otro de los parámetros a considerar es la presencia de materia orgánica en los suelos. La importancia de ésta, en los procesos de adsorción de plaguicidas ha generalizado el uso del denominado coeficiente de reparto normalizado respecto al contenido de carbono orgánico ( $oc$ ), definido como  $K_{oc} = K_d/foc$ , siendo  $foc$  = gramos  $oc$ /gramos suelo. La cuestión es que, para un determinado plaguicida y para diversos suelos,  $K_{oc}$  presenta menos variación que  $K_d$ . Esta generalización es válida para plaguicidas no ionizables. La adsorción de componentes ionizables (ácidos y bases orgánicas), los efectos del pH del suelo, composición de la solución del suelo y características de la matriz adsorbente deben ser consideradas. (Morell y Candela, 1998). Cuando la isoterma no es lineal y constante, hay diversas expresiones matemáticas que permiten obtener aproximaciones válidas para describir la distribución del contaminante entre el

suelo y la disolución. Las más utilizadas son las ecuaciones de Freundlich y de Langmuir. La ecuación general de la isoterma de Freundlich es (Ecuación 2.1):

$$C_s = K C_m^n \quad (2.1)$$

Dónde:

K: es la constante de adsorción

n: constante con un valor entre 0 y 1.

La forma lineal de la ecuación 1 es (Ecuación 2.2):

$$\log C_s = \log K + n \log C_m \quad (2.2)$$

El valor de la constante de adsorción K corresponde al corte de la línea obtenida con el eje de ordenadas. La forma general de la isoterma de Langmuir es (Ecuación 2.3.):

$$C_s = \frac{A C_m}{1 + B C_m} \quad (2.3)$$

Dónde:

A y B: son constantes que dependen del tipo de suelo y de la especie química considerada. La forma lineal de la ecuación es (Ecuación 2.4):

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{A} \times \frac{1}{C_m} + \frac{B}{A} \quad (2.4)$$

Dónde:

A: constante que se denomina  $K_m$  y representa la capacidad máxima de adsorción.

B/A: es una nueva constante, denominada  $b$ , que está relacionada con la energía de adsorción.

Teniendo en cuenta las nuevas constantes, la isoterma de Langmuir queda (Ecuación 2.5):

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{K_m} \times \frac{1}{C_m} + b \quad (2.5)$$

Suponiendo que  $C_m$  tiende a cero, la constante de adsorción ( $K_m$ ) se puede obtener como la inversa de la pendiente de la recta obtenida al representar la isoterma ( $1/C_s$  frente  $1/C_m$ ). La constante así obtenida se denomina  $K_m$  (Morell y Candela, 1998).



## **2.4 Características fisicoquímicas de los plaguicidas y su transporte en el ambiente**

Para entender el comportamiento de un plaguicida en el ambiente, se necesita conocer cierta información sobre las propiedades físico-químicas de la molécula y su mecanismo de transporte, así como las características ambientales y las características geográficas del lugar en el que se le encuentra. Con la gran complejidad y cantidad de datos requeridos, los científicos no siempre pueden predecir exactamente lo que ocurrirá con una partícula de plaguicida cuando ésta se encuentra en el ambiente. A este problema, se suma el hecho de que los datos de las investigaciones son obtenidos bajo condiciones controladas de laboratorio y con cantidades conocidas de plaguicida, lo cual no ocurre en la naturaleza (INE, 2004).

A pesar de lo complejo del problema, los científicos han logrado determinar ciertas características físico-químicas cuantificables para los plaguicidas, como es la solubilidad, presión de vapor, constante de la Ley de Henry, el coeficiente de carbono orgánico (Koc) y el coeficiente de partición Octanol-Agua (Kow). Con esta información pueden predecir el lugar donde pudiera encontrarse un plaguicida en altas concentraciones. Por otra parte, la molécula de plaguicida no permanece intacta por tiempo indefinido en el ambiente, ya que con el tiempo sufre una degradación influenciada por microorganismos, actividad química, pH, clima, y contenido de materia orgánica del suelo, entre otros.

## **2.5 Características ambientales de los plaguicidas**

Son los lugares en que puede encontrarse presente el plaguicida como: materiales o sustancias de desecho, agua subterránea o superficial, aire, suelo, subsuelo, sedimento y biota. Durante la aplicación de los plaguicidas solamente el 1 % llega al organismo que se quiere eliminar, el 25 % es retenido en el follaje, el 30 % llega al suelo y el 44 % es exportado a la atmósfera y a los sistemas acuáticos por escorrentía o lixiviación (Brady y Weil, 1996).

Lo que trae consigo que, el agricultor aplique cada vez más estos productos generando resistencia en estos organismos, la contaminación del agua superficial y subterránea, siendo la lixiviación, percolación algunas de las causas del deterioro de la calidad del agua, así como afectaciones en el suelo en el cual es aplicado el plaguicida.

## 2.6 Mecanismos de transporte ambiental de los plaguicidas

Es la forma en que se mueven los plaguicidas en el ambiente, desde la fuente emisora del plaguicida hasta los puntos donde existe exposición para el ser humano o biota. El transporte ambiental involucra los movimientos de gases, líquidos y partículas sólidas dentro de un medio determinado, y a través de las interfaces entre el aire, el agua, sedimento, suelo, plantas y animales (ATSDR, 1995). Los principales mecanismos de transporte ambiental de los plaguicidas son:

**Difusión:** es el movimiento de moléculas debido a un gradiente de concentración. Este movimiento es al azar pero trae como consecuencia el flujo de materiales desde las zonas más concentradas a las menos concentradas. Para medir la difusión de un compuesto en el suelo hay que considerar la interacción conjunta de parámetros tales como: la porosidad, los procesos de adsorción, la naturaleza del compuesto, etc.

**Lixiviación:** es el parámetro más importante de evaluación del movimiento de una sustancia en el suelo. Está ligado a la dinámica del agua, a la estructura del suelo y a factores propios del plaguicida. Los compuestos aplicados al suelo tienden a desplazarse con el agua y lixiviar a través del perfil, alcanzando las capas más profundas y el acuífero, que en consecuencia resulta contaminado.

**Evaporación:** la tasa de pérdida de un plaguicida por volatilización depende de su presión de vapor, de la temperatura, de su volatilidad intrínseca y de la velocidad de difusión hacia la superficie de evaporación.

## 2.7 Influencia de las características del lugar en el transporte de plaguicidas

Las características físicas y las condiciones climáticas de la zona de análisis de estudio contribuyen al transporte de los contaminantes. Por consiguiente, es necesaria la información acerca de la topografía, tipos de suelo y ubicación, tipo de cubierta del suelo, precipitación anual, condiciones de temperatura, entre otros, para poder estimar hacia donde pudiera desplazarse el plaguicida aplicado.

## 2.8 Factores fisicoquímicos que inciden en el destino de los contaminantes y en el transporte ambiental

**Volatilización:** la volatilidad representa la tendencia del plaguicida a pasar a la fase gaseosa. Todas las sustancias orgánicas son volátiles en algún grado dependiendo de su presión de vapor, del estado físico en que se encuentren y de la temperatura del ambiente. La volatilidad se mide a partir de la constante de Henry que depende de la presión de vapor en estado líquido y de la solubilidad en agua (ATSDR, 1995).

**Presión de vapor:** es una medida de volatilidad de una sustancia química (plaguicida) en estado puro y es un determinante importante de la velocidad de volatilización al aire desde suelos o cuerpos de agua superficiales contaminados. Los factores que afectan la tasa de volatilidad son la temperatura, velocidad del viento, las condiciones de suelo de un sitio particular, así como las características de adsorción y la solubilidad en agua del compuesto. La presión de vapor se expresa usando una variedad de unidades, incluyendo los pascales (Pa), milímetros de mercurio (mm Hg), libras por pulgada cuadrada (lb/pulg<sup>2</sup>) y atmósferas (atm). La unidad del sistema internacional de presión de vapor es en pascales (Newton/m<sup>2</sup>) o en milipascales (10<sup>-3</sup> Pa) (ATSDR, 1995).

Un plaguicida con presión de vapor mayor a 10.6 mm Hg puede fácilmente volatilizarse y tiende a alejarse del lugar donde se aplicó. Los plaguicidas con presión de vapor menor a 1.0 x10<sup>-8</sup> (1.0 E<sup>-08</sup>) tienen bajo potencial para volatilizarse. Los plaguicidas con una presión de vapor mayor a 1.0 x10<sup>-3</sup> (1.0 E<sup>-03</sup>) tienen alto potencial para volatilizarse.

**Constante de la Ley de Henry (H):** Describe la tendencia de un plaguicida a volatilizarse del agua o suelo húmedo. El valor se calcula usando la presión de vapor, solubilidad en agua y peso molecular de un plaguicida.

El coeficiente de partición aire-agua ( $H_c$ ) es:

$$H_c = p/c \quad (2.6)$$

Dónde:

p = presión de vapor del plaguicida (Pa)

c = solubilidad en agua (mol m<sup>-3</sup>)

$$H_c = \text{Pa/mol. m}^{-3} = \text{Pa m}^3/\text{moles}$$

$$H_c = p' \times \text{PM} \times 10^{-3} / c' \quad (2.7)$$

$$H_c = \text{mPa} \times \text{PM} \times 10^{-3} / \text{ppm} \quad (2.8)$$

Dónde:

$p'$  = presión de vapor del plaguicida (mPa)

PM = peso molecular del plaguicida (g/gmol)

$c'$  = solubilidad en agua (ppm)

Cuando el plaguicida tiene una alta solubilidad en agua con relación a su presión de vapor, el plaguicida se disolverá principalmente en agua. Un valor alto de la Ley de Henry, indica que un plaguicida tiene un potencial elevado para volatilizarse del suelo húmedo; un valor bajo predice un mayor potencial de lixiviación del plaguicida.

**Persistencia:** se define como la capacidad de cualquier plaguicida para retener sus características físicas, químicas y funcionales en el medio en el cual es transportado o distribuido, durante un período limitado después de su emisión. Los plaguicidas que persisten más tiempo en el ambiente, tienen mayor probabilidad de interactuar con los diversos elementos que conforman los ecosistemas. Si su vida media y su persistencia es mayor a la frecuencia con la que se aplican, los plaguicidas tienden a acumularse tanto en los suelos como en la biota (CICOPLAFEST, 2004) y con el tiempo, la mayoría de los plaguicidas sufren una degradación como resultado de reacciones químicas y microbiológicas en suelo o agua.

**Vida media:** la vida media está definida como el tiempo (en días, semanas o años) requerido para que la mitad del plaguicida presente después de una aplicación se descomponga en productos de degradación. La descomposición depende de varios factores incluidos la temperatura, el pH del suelo, los microorganismos presentes en el suelo, clima, exposición del plaguicida a la luz, agua y oxígeno. Es importante señalar que muchas sustancias resultantes de la descomposición de un plaguicida pueden ser también tóxicas y tener vidas medias significativas. Existen diferentes tipos de clasificar a la vida media de un plaguicida, como son:

**Vida media en suelo:** Es el tiempo requerido para que un plaguicida se degrade en el suelo. La vida media está determinada por el tipo de organismos presentes en el suelo, el tipo de suelo

(arena, arcilla, limo), pH y temperatura, entre otros. El Departamento de Regulación de Plaguicidas en California, E.U., determinó que un plaguicida que tiene una vida media mayor a 9 días en un suelo aeróbico puede tener potencial para contaminar aguas subterránea.

**Vida media por fotólisis:** Es el tiempo requerido para que la mitad de un plaguicida aplicado expuesto a la luz del sol se degrade.

**Vida media por hidrólisis:** Es el tiempo requerido para que la mitad de un plaguicida aplicado se degrade por la acción del agua. El Departamento de Regulación de Plaguicidas en California, E.U., determinó que un plaguicida con una hidrólisis mayor de 14 días tiene potencial para contaminar agua subterránea.

**Solubilidad en agua:** la solubilidad en agua de un plaguicida, es una medida que determina la máxima concentración de un plaguicida que se disuelve en un litro de agua y por lo general tiene un rango de 1 a 100,000 mg/l. Las unidades de concentración son: mg por litro (mg/l), que es aproximadamente igual a una parte por millón (ppm) o un microgramo por litro ( $\mu\text{g/l}$ ), que es aproximadamente igual a una parte por billón (ppb); ppm = parte por millón = 1 mg/l, ppb = parte por billón = 1  $\mu\text{g/l}$ . Es importante mencionar que la mayoría de los valores reportados fueron determinados en experimentos de laboratorio a temperaturas de 20 a 25 °C. Los plaguicidas muy solubles en agua se adsorben con baja afinidad a los suelos y por lo tanto, son fácilmente transportados del lugar de la aplicación por una fuerte lluvia, riego o escurrimiento, hasta los cuerpos de agua superficial y/o subterránea. El departamento de Regulación de Plaguicidas en California, E.U. determinó que los plaguicidas con una solubilidad mayor a 3 mg/l tiene potencial para contaminar agua subterránea. Sin embargo en E.U., plaguicidas con solubilidad en agua menor de 3 mg/l se han encontrado en agua subterránea, lo cual indica que el parámetro antes mencionado no es una garantía. La solubilidad en agua de numerosos químicos puede ser encontrada en numerosos tratados químicos, incluyendo las bases de datos de perfiles toxicológicos (ATSDR, 1995)

**Coefficiente de adsorción de carbono orgánico (Koc):** a este valor también se le conoce como coeficiente de adsorción suelo/agua o el coeficiente de adsorción. Es una medida de la tendencia de un compuesto orgánico a ser adsorbido (retenido) por los suelos o sedimentos.

$$K_{oc} = K_d \times 100/\%oc \quad (2.9)$$

Dónde:

% oc = es el porcentaje de carbono orgánico en el suelo = % materia orgánica / 1.72.

El K<sub>oc</sub> es específico para cada plaguicida y es sumamente independiente de las propiedades del suelo. Los valores del K<sub>oc</sub> van de 1 a 10, 000,000. Un K<sub>oc</sub> elevado indica que el plaguicida orgánico se fija con firmeza en la materia orgánica del suelo, por lo que poca cantidad del compuesto se mueve a las aguas superficiales o a los acuíferos.

**El coeficiente de partición octanol/agua, K<sub>ow</sub>:** es una medida de cómo una sustancia química puede distribuirse entre dos solventes inmiscibles, agua (es un solvente polar) y octanol (es un solvente relativamente no polar, que representa a las grasas). El K<sub>ow</sub> proporciona un valor de la polaridad de un plaguicida, que es frecuentemente utilizado en modelos para determinar como un plaguicida puede distribuirse en tejido de grasa animal.

$$K_{ow} = C_{octanol} / C_{agua} \quad (2.10)$$

Dónde:

C = la concentración molar

$$pK_{ow} = -\log_{10} K_{ow}$$

Los plaguicidas con una vida media y un K<sub>ow</sub> altos, pueden acumularse en tejido graso y bioacumularse a lo largo de la cadena trófica.

## 2.9 Suelo

Es la parte exterior de la corteza terrestre en la que vive una microbiota, flora y fauna microbiana, que trabajando en conjunto, transforman materia mineral en alimento de las plantas, que posteriormente pueden ser utilizados por animales y seres humanos. El suelo en conjunto con el agua en forma de lluvia o de corrientes, permite el establecimiento de las actividades agrícolas, forestales y ganaderas (Doran, 1996; SEMARNAT, 2003). Por otro lado, la FAO (1983) define la degradación del suelo como las pérdidas de las propiedades intrínsecas del suelo lo que disminuye sus funciones y su capacidad actual y potencial para producir bienes y servicios.

La textura o granulometría se refiere a las proporciones relativas en la tierra fina, de las distintas partículas minerales inferiores a 2 mm, agrupadas por clases de tamaños tras la destrucción de agregados (FAO, 2009).

La textura desde el punto de vista cuantitativo es la proporción relativa, en general reportada como porcentajes, de las partículas individuales o primarias que componen al suelo. El procedimiento por medio del cual se puede cuantificar la proporción en que se encuentran los diferentes tamaños de partículas primarias de un suelo, se conoce como análisis mecánico. Los datos obtenidos, permiten, utilizar el llamado triángulo textural.

### **Densidad aparente**

La densidad aparente del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco (105 °C). Este volumen incluye tanto sólidos como los poros, por lo que la densidad aparente refleja la porosidad total del suelo. Valores de densidad aparente bajos (generalmente por debajo de 1,3 kg dm<sup>-3</sup>) indican generalmente una condición porosa del suelo. Este parámetro es trascendental para la descripción de la calidad del suelo y la función del ecosistema. Los valores de densidad aparente altos indican un ambiente pobre para el crecimiento de raíces, aireación reducida, y cambios indeseables en la función hidrológica como la reducción de la infiltración del agua (FAO, 2009).

Existen muchos métodos para determinar la densidad aparente del suelo. Uno de ellos consiste en obtener un volumen de suelo conocido, secarlo para remover el agua y pesar la masa seca. Otro utiliza un instrumento especial (cilindro metálico) para obtener una muestra de suelo de volumen conocido sin disturbar su estructura natural y después determinar la masa seca.

### **El agua en el suelo: permeabilidad, infiltración**

El agua que penetra a través de la superficie del terreno se dice que se ha infiltrado. De esta agua infiltrada, una parte es retenida por el suelo, hasta alcanzar la capacidad de campo, y una vez superada esta retención máxima, el resto del agua desciende por gravedad hasta el nivel de saturación (o nivel freático) y se denomina infiltración eficaz (o recarga por infiltración vertical).

Métodos de cálculo de la infiltración:

Numérica de la ecuación de Richards

Fórmulas empíricas: Horton

Experimentalmente: Lisímetros

Infiltrómetros. Miden la capacidad del suelo para infiltrar.

Entre los factores que se encuentran en el movimiento del agua en el suelo durante el proceso de la infiltración son: cantidad de materia orgánica en el suelo, cantidad de agua en el suelo, temperatura del suelo, estructura del suelo, porcentaje de arena, limo y arcilla.

## **Permeabilidad**

La permeabilidad hace referencia a la velocidad con que puede circular el agua dentro del suelo (conductividad hidráulica). Por lo tanto, la conductividad hidráulica es la permeabilidad que presenta un suelo al agua; también se le puede definir como el cociente del flujo unitario de agua entre el gradiente hidráulico, en la Ley de Darcy.

## **Reacciones del suelo pH**

El pH y el intercambio catiónico son propiedades químicas primordiales en la caracterización del suelo; estas propiedades son el resultado de las interacciones de la fracción mineral y en menor proporción de la materia orgánica. El pH se le denomina como el logaritmo inverso de la concentración de iones de hidrógenos en gramos por litro en un sistema.

## **Materia orgánica**

La materia orgánica (MO) se refiere a todo el material de origen animal o vegetal que esté descompuesto, parcialmente descompuesto y sin descomposición, el cual desempeña funciones importantes en el suelo. Generalmente es sinónimo con el humus aunque este término es más usado cuando nos referimos a la materia orgánica bien descompuesta llamada sustancias húmicas (Schnitzer, 2000; FAO, 2009). En suelos con alto contenido de materia orgánica propicia las mejores condiciones físicas, químicas y biológicas para los cultivos, lo que genera una mayor productividad agrícola.



La concentración mayor de materia orgánica se encuentra generalmente en el suelo superficial y varía con la época del año, es mayor cuando la lluvia y la temperatura favorecen el crecimiento de las plantas y la velocidad de descomposición de este material es lenta. Walkley y Black la clasifican como se muestra en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Clasificación de la materia orgánica en suelo.

Clase	Materia orgánica	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
<b>Muy bajo</b>	< 4.0	< 0.5
<b>Bajo</b>	4.1-6.0	0.6-1.5
<b>Normal</b>	6.1-10.9	1.6-3.5
<b>Alto</b>	11.0-16.0	3.6-6.0
<b>Muy alto</b>	> 16.1	> 6.0

*Fuente: NOM-021-SEMARNAT (2000).*

### **Coefficiente de impacto ambiental (CIA)**

Esta metodología fue desarrollada por Kovach *et al.* (1992) (Tabla 2.2), el CIA es un indicador para valorar al potencial de riesgo causado por el uso de plaguicidas. Este valor valora el impacto ocasionado de los plaguicidas a los agricultores que lo aplican, a los consumidores y a los componentes ecológicos. Esta metodología requiere de datos como: el tipo de plaguicida, el número de aplicaciones, el número de agricultores que lo usan y las dosis usadas.

Existen valores del coeficiente de impacto ambiental (CIA) para muchos plaguicidas, pero no para todos, cuando un plaguicida no tiene valor de CIA, deberá usarse el promedio de CIA dependiendo a la clase de plaguicida al que pertenezca, también puede usarse la clasificación de peligrosidad, recomendada por la OMS para estimar el CIA. El cálculo de la CIA se basa en una metodología de ponderación para evaluar el riesgo ambiental y de salud en la aplicación de un plaguicida en específico, este modelo usa datos toxicológicos e información de parámetros químicos para calcular el riesgo por exposición al plaguicida a los agricultores, consumidores y organismos ambientales, y de esta forma generar un coeficiente compuesto de impacto

ambiental para cada plaguicida (Ortiz y Pradel, 2009). La ecuación para para calcular el valor del coeficiente de impacto ambiental (CIA) para cada plaguicida seleccionado es la siguiente:

$$EIQ = \{C [(DT*5) + (DT*P)] + [(C*((S + P) / 2)*SY) + (L)] + [(F*R) + (D*((S + P) / 2)*3) + (Z*P*3) + (B* P*3)]\} / 3 \quad (2.11)$$

Dónde:

EIQ = Coeficiente de Impacto Ambiental (CIA), DT = Toxicidad dérmica del plaguicida, C = Toxicidad crónica, SY = Sistemática, F = Toxicidad en peces, D = Toxicidad en aves, L = Potencial de lixiviación, R = Superficie de pérdida del potencial, S = Vida media en el suelo, Z = Toxicidad en abeja, B = Toxicidad en artrópodos (toxicidad en insectos benéficos) y P = Vida media en la planta.

**Tabla 2.2.** Sistema de clasificación utilizado para desarrollar el coeficiente de impacto ambiental (Kovach et al., 1992).

Variable	Símbolo	Valoración de la variable		
		1	3	5
Modo de acción	SY	No sistémico	Sistémico	
Toxicidad de peces (ppm) CL <sub>50</sub> 96h	F	> 10	1-10	< 1
Toxicidad dermal aguda (mg/kg) para conejos/ratas	DT	>2000	200 – 2000	0 - 200

Toxicidad aves (ppm) 8 días LC <sub>50</sub>	D	> 1000	100-1000	1-100
Toxicidad crónica (efectos a la salud a largo plazo)	C	poco o ninguna	posible	definido
Toxicidad para abejas	Z	relativamente no tóxico	moderadamente tóxico	altamente tóxico
Persistencia en la superficie de la planta (semanas)	P	1-2	2-4	> 4
Toxicidad artrópodos u organismos Benéficos	B	bajo impacto	impacto moderado	impacto severo
Persistencia en el suelo (días) vida media	S	<30 días	30-100 días	>100
Potencial de filtración	L	Poco	Medio	Alto
Potencial pérdida de suelo	R	Poco	Medio	Alto

Una vez establecidos el CIA para cada uno de los plaguicidas, se determina el impacto ambiental en campo de la siguiente forma:  $\text{Impacto ambiental} = \text{EIQ} * \text{i.a.} * \text{dosis} * \text{frecuencia}$ . Donde; EIQ= cociente de impacto ambiental obtenido de tablas (Kovach *et al.*, 1992); i.a.= ingrediente activo del producto formulado; dosis = cantidad de producto comercial aplicado en campo y frecuencia = número de aplicaciones.



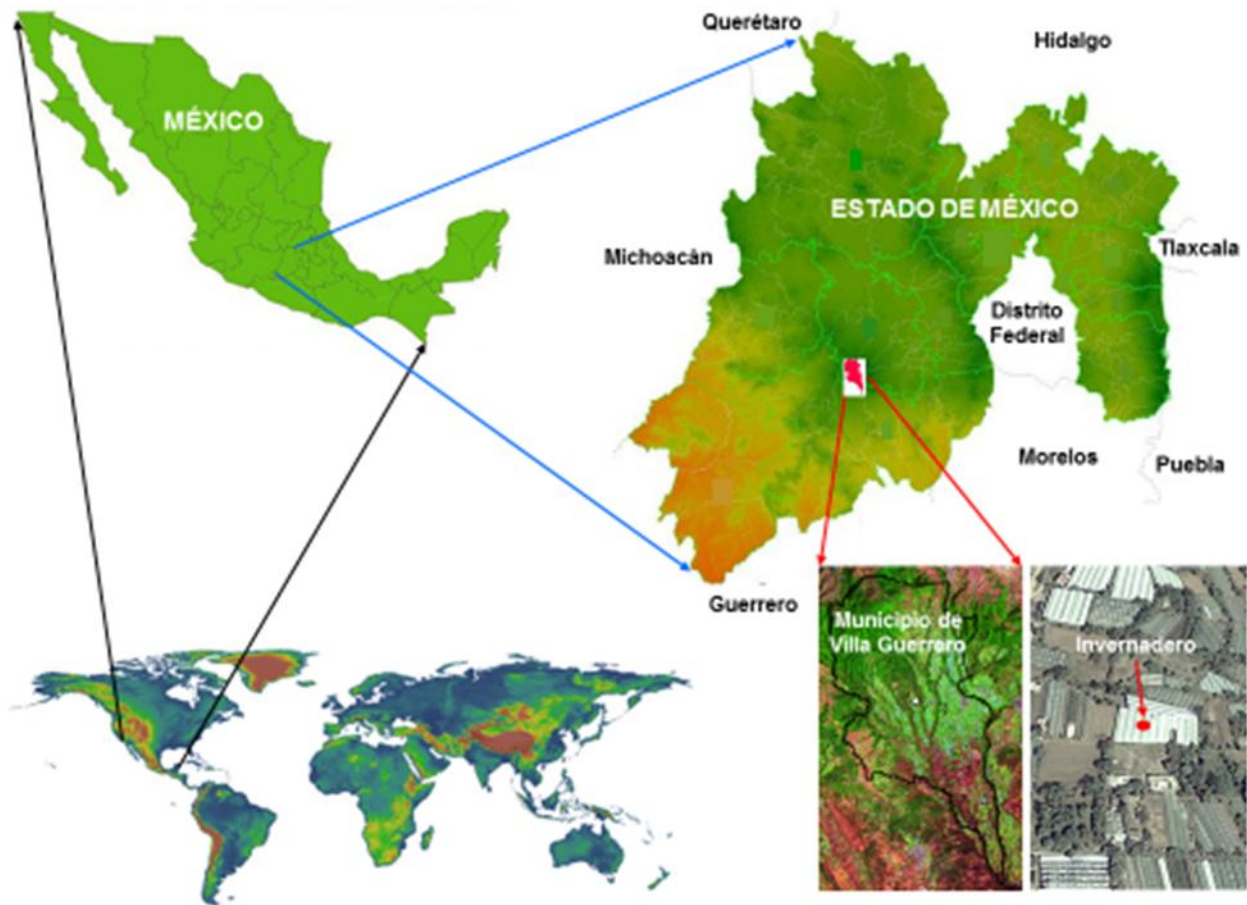
# CAPÍTULO 3

## CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1 Ubicación geográfica y características climatológicas

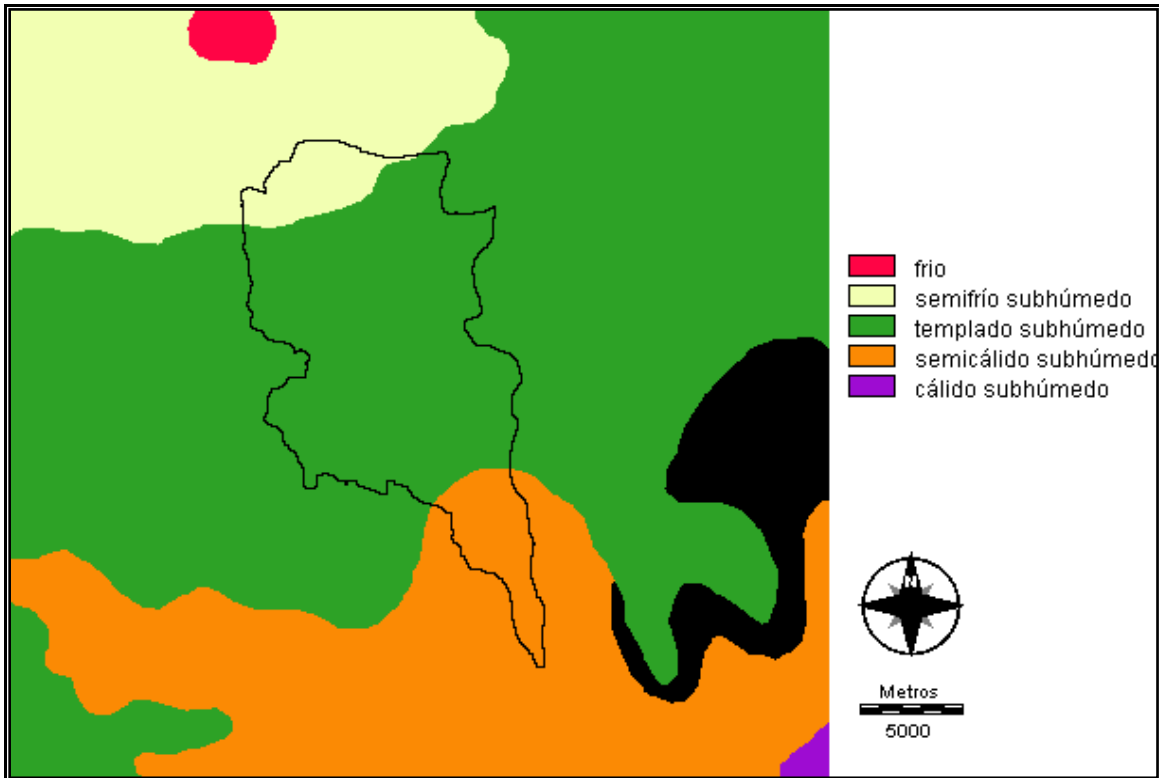
La zona de estudio se localiza en San Mateo Coapexco, población perteneciente al municipio de Villa Guerrero ubicado en la región sur del Estado de México, México. Se encuentra entre los paralelos  $18^{\circ} 49'$  y  $19^{\circ} 03'$  de latitud norte; los meridianos  $99^{\circ} 36'$  y  $99^{\circ} 45'$  de longitud oeste (Figura 3.1), con una altitud de entre 1,400 y 3,800 metros sobre el nivel del mar (msnm). Colinda al norte con los municipios de Tenango del Valle y Calimaya, al este con Tenancingo y Zumpahuacán, al sur con Ixtapan de la Sal, al oeste con Coatepec Harinas. Ocupa el 0.94 % de la superficie del Estado. Cuenta con 5 pueblos y 35 rancherías y una población de 59,991 habitantes según el censo de población y vivienda 2010 (INEGI, 2010).



**Figura 3.1.** Localización geográfica de la zona de estudio.

*Fuente: Elaboración propia*

El clima predominante en el municipio de Villa Guerrero es de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano y una humedad de 80.42 %, semicálido subhúmedo con lluvias en verano y una humedad media (10.73 %) y semifrío subhúmedo con lluvias en verano con una humedad de 8.85 % (Figura 3.2). En la zona se presenta una precipitación pluvial anual de entre 1,000 y 1,500 mm y una temperatura media anual que oscila entre 6 y 22 °C (INEGI, 2009).



*Figura 3.2. Tipos de climas que prevalecen en la zona de estudio*

### 3.2 Hidrología superficial

La cuenca hidrológica en la que se localiza la zona de estudio corresponde a la Región Hidrológica número 18 del río Balsas, específicamente, en la cuenca del río Amacuzac en la parte Alta (Argueta, 2001; INEGI, 2009). La red hidrográfica principal que ubica en la zona está compuesta por los ríos:

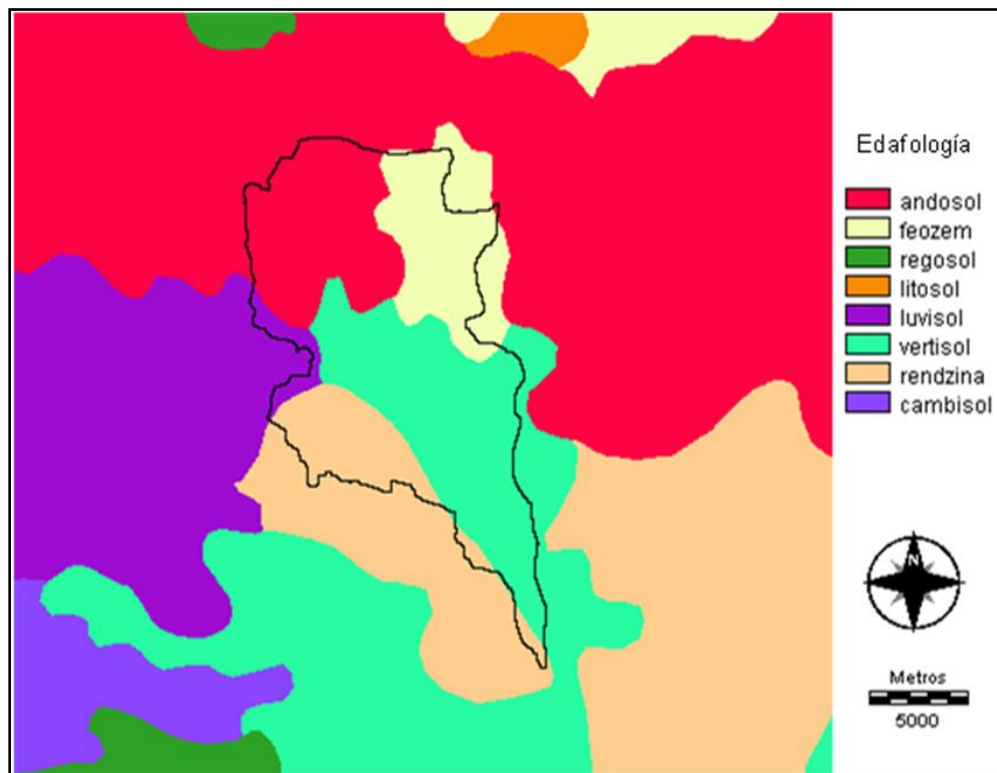
**Perennes:** Calderón, Cuajimalpa, El Salto, Grande, Los Ocotes, Los Reyes, Los Sabinos, Los Tizantes, Nenetzingo, San Gaspar, San Jerónimo, San Mateo, Tenancingo y Tintojo.

**Intermitentes:** Los Cuervos, El Cebadero, Texcalienco, Tequimilpa, Los Tizantes, Calderón, Paso Hondo, Nenetzingo y Temozolapa.

### 3.3 Edafología

Según datos de INEGI (2009), la zona está conformada principalmente por los siguientes tipos de suelo: Andosol (37.35 %), Vertisol (20.39 %), Cambisol (15.44 %), Feozem (7.97 %),

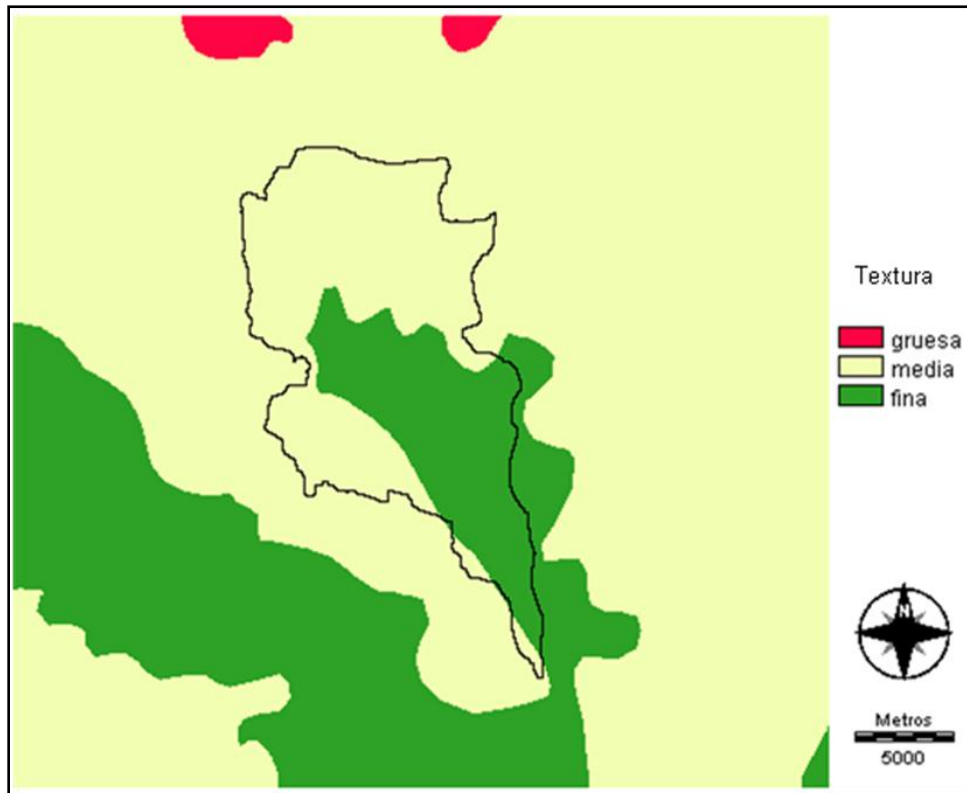
Regosol (6.43 %), Luvisol (6.3 %) y Leptosol (2.31 %). La distribución espacial de los suelos anteriormente mencionados, se muestran en la imagen de la figura 3.3.



**Figura 3.3.** Descripción edafológica de la zona.

Así mismo, las clases o tipos de texturas correspondientes a los diferentes tipos de suelos que prevalecen en la zona, se muestran distribuidos espacialmente en la figura 3.4, información que permite inferir de manera instantánea que tan permeables son los suelos de la zona (INEGI, 2009).





**Figura 3.4.** Textura de suelo presentes en la zona

### 3.4 Geología

Basados en información obtenida de INEGI (2009), la geología presente en la zona está conformada por los siguientes tipos de rocas:

**Sedimentaria:** arenisca-conglomerado (39.5 %), brecha sedimentaria (27.65 %) y caliza (0.01 %). **Ígnea extrusiva:** andesita (13.09 %), volcanoclástico (5.3 %), toba ácida (4.86 %) y basalto (1.45 %). **Metamórfica:** metasedimentaria (2.67 %). **Suelo:** aluvial (1.66 %).

# Capítulo 4

## METODOLOGÍA

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Esquema metodológico

Con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos planteados en la investigación se realizaron diferentes etapas, las cuales se muestran en el diagrama metodológico general de la figura 4.1. Cabe señalar que, cada una de estas se irán describiendo posteriormente.

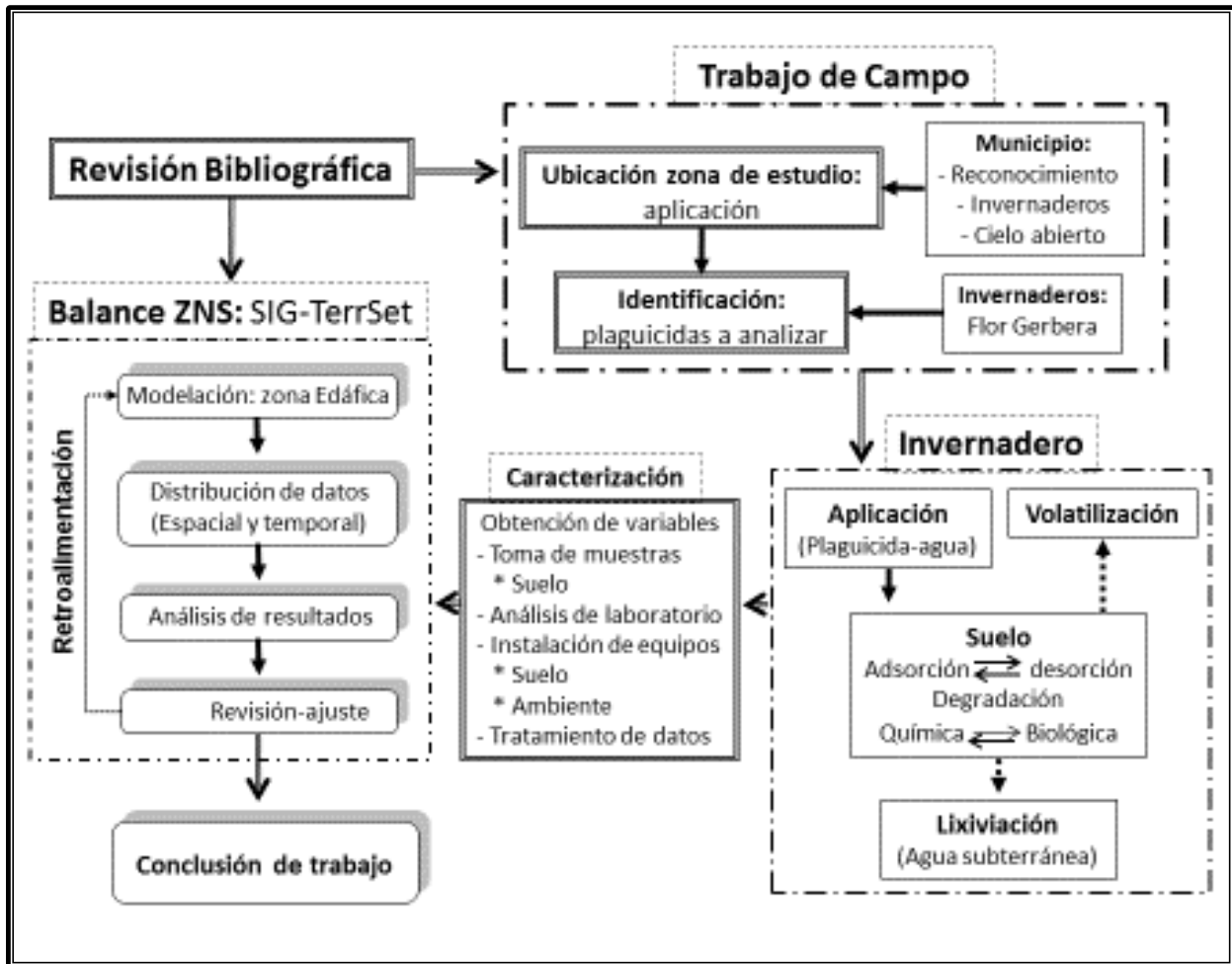
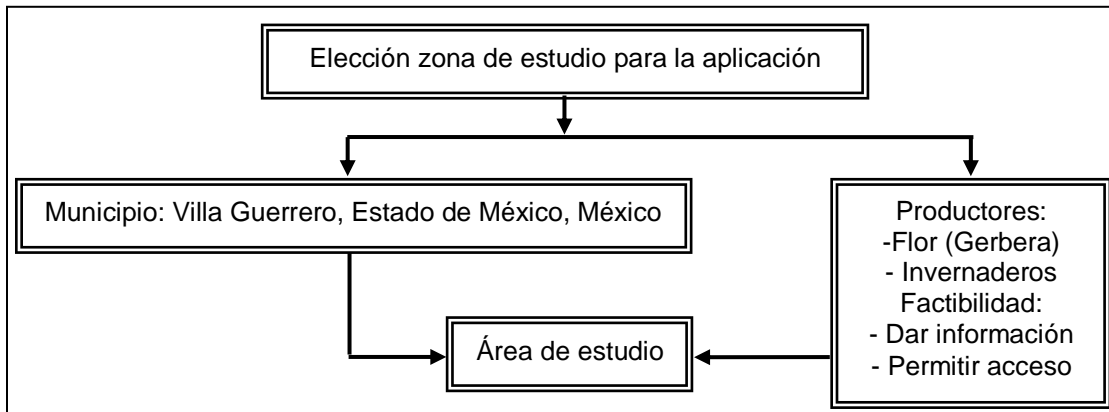


Figura 4.1. Diagrama metodológico del trabajo de investigación.

### 4.2 Ubicación del área de estudio para la aplicación

En el área florícola de estudio (Villa Guerrero, Estado de México, México), se contactó a productores de la zona, que tuvieron la factibilidad de brindar información respecto a las

actividades florícolas realizadas y que permitieran el acceso a las áreas de cultivo (Figura 4.2), con el objeto de instalar equipos y tomar muestras de suelo y así, poder obtener datos y registros de variables durante el estudio, que son requeridos para poder alcanzar los objetivos planteados en el trabajo de investigación.

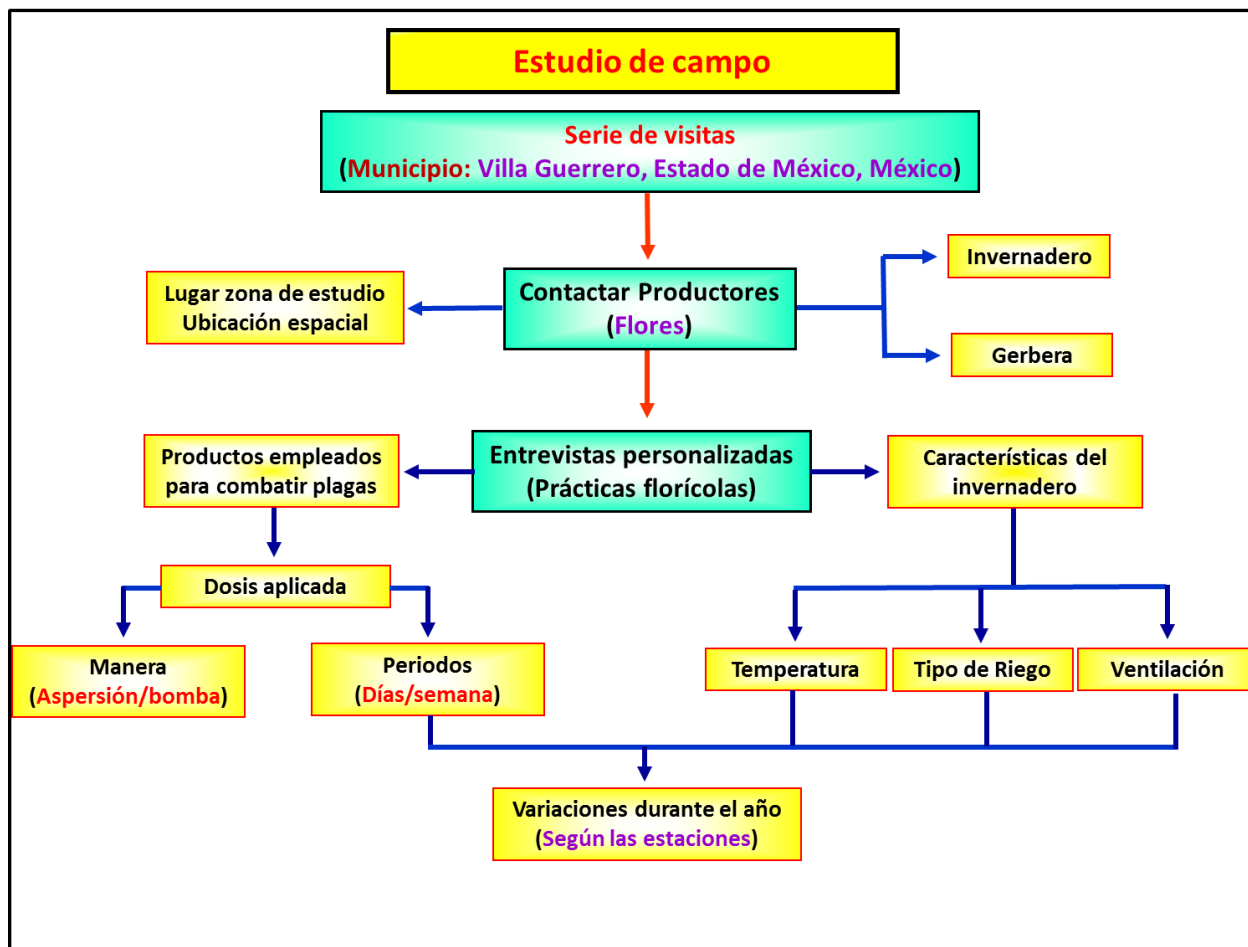


**Figura 4.2.** Esquema de análisis para elegir el área de aplicación del estudio.

Para ello, se realizaron varias visitas a campo con el objetivo de conocer la zona de estudio, contactar a los productores, a los invernaderos y las actividades que se llevan a cabo durante la producción de flor, tal como se puede observar en el diagrama de la figura 4.3, para lo cual se entrevistaron de forma personalizada a algunos productores de la flor Gerbera.

En la elección de los productores de flor en invernaderos, los puntos que se tomaron en cuenta para llevar a cabo el presente trabajo, fueron los siguientes criterios:

- a) Contactar solo a productores de la flor Gerbera (invernadero) que se ubiquen dentro del municipio de Villa Guerrero, del Estado de México, México.
- b) Tener accesibilidad a información de las actividades que desempeñan cotidianamente durante la producción de la flor.
- c) Brindar el acceso a sus áreas de trabajo (invernaderos).
- d) Permitir instalar equipos para la caracterización de variables requeridas para el estudio y tomar muestras de suelo para su caracterización en el laboratorio.



*Figura 4.3. Diagrama general del trabajo de campo.*

Con base en los criterios señalados anteriormente, se contactaron a 4 productores de la flor Gerbera en invernadero. Se tomaron las ubicaciones geográficas de estos invernaderos para espacializarlos en imágenes, utilizando un sistema de geoposicionamiento global (GPS).

Durante las entrevistas sostenidas con los productores, se les preguntó respecto a los productos agroquímicos que emplean para el cultivo de Gerbera, tipos de invernadero, formas de riego, duración del cultivo, cantidades utilizadas y formas de aplicación.

#### **4.3 Ubicación geográfica del área de estudio**

Para ubicar geográfica y espacialmente la zona de estudio a través de imágenes, primero fue necesario adquirir la imagen vectorial de los límites municipales del Estado de México (INEGI,

2014). Después, se obtuvo una imagen de satélite SRTM de modelo numérico de altitud (MNA) en el cual se localiza la zona de estudio para ser importado al software de SIG TerrSet, con el fin de ser empleado en diferentes procesos posteriores a través de módulos implementados en TerrSet. Posteriormente, se recortó una imagen de MNA empleando el módulo WINDOW, correspondiente a los siguientes rangos de coordenadas geográficas: entre los paralelos  $18^{\circ} 40' 06''$  y  $19^{\circ} 21' 27''$  de latitud norte, y entre los meridianos  $18^{\circ} 40' 06''$  y  $19^{\circ} 21' 27''$  de longitud oeste entre los que se localizan los invernaderos.

Con base en lo anterior, se obtuvo información de las condiciones ambientales prevaletientes y físicas de la zona de estudio, como son: tipo de suelo, textura, clima y de las principales fuentes de abastecimiento de agua para riego que emplean en la zona, de entre otras variables.

#### **4.3.1 Identificación y elección del invernadero**

Una vez contactados los productores de los invernaderos mencionados anteriormente, se realizaron una serie de entrevistas a sólo tres de los productores, debido a que, de los cuatros productores, el técnico encargado de uno de los invernaderos, no se encontraba cada que se visitaba el invernadero. Dentro de las preguntas que se realizaron, destacan las siguientes: el tipo de plaguicida que emplean según la plaga a controlar (hongos, insectos, maleza, etc.) que inhiben la producción de la flor Gerbera (Figura 4.4), variación de uso por época del año. Así como, los productos requeridos para el desarrollo de dicha especie de flor, las formas de riego y de aplicación de los plaguicidas, dosis empleadas, periodos de aplicación, etc. Esto se realizó a través de preguntas cerradas y abiertas, lo que facilitó que los productores expresaran su opinión, cabe señalar que, fue muy importante para el trabajo de campo la observación para poder realizar la caracterización de los invernaderos.

#### **4.3.2 Identificación y elección de plaguicidas empleados en la producción de Gerbera en invernadero.**

Con la información obtenida durante las entrevistas de trabajo de campo se elaboró una base de datos de los plaguicidas empleados en cada invernadero, a partir de sus nombres comerciales e ingredientes activos. El diagrama de la figura 4.4 describe el proceso empleado para la clasificación de los plaguicidas usados en los invernaderos contactados.

## Productos empleados para combatir plagas (Cultivo de la flor de Gerbera)



**Figura 4.4.** Proceso de clasificación de plaguicidas empleados en invernaderos.

### 4.4 Criterios de selección de los plaguicidas a estudiar

El diagrama de la figura 4.5 describe en síntesis cuales fueron los principales criterios considerados para determinar los plaguicidas a modelar, que de forma sintetizada fueron los siguientes tres: los que se han aplicado más comúnmente en los invernaderos de estudio, que tuvieran un valor alto de su Coeficiente de Impacto Ambiental (CIA) (Kovach *et al.*, 1992) y sus propiedades fisicoquímicas (como la persistencia de los compuestos por ejemplo).

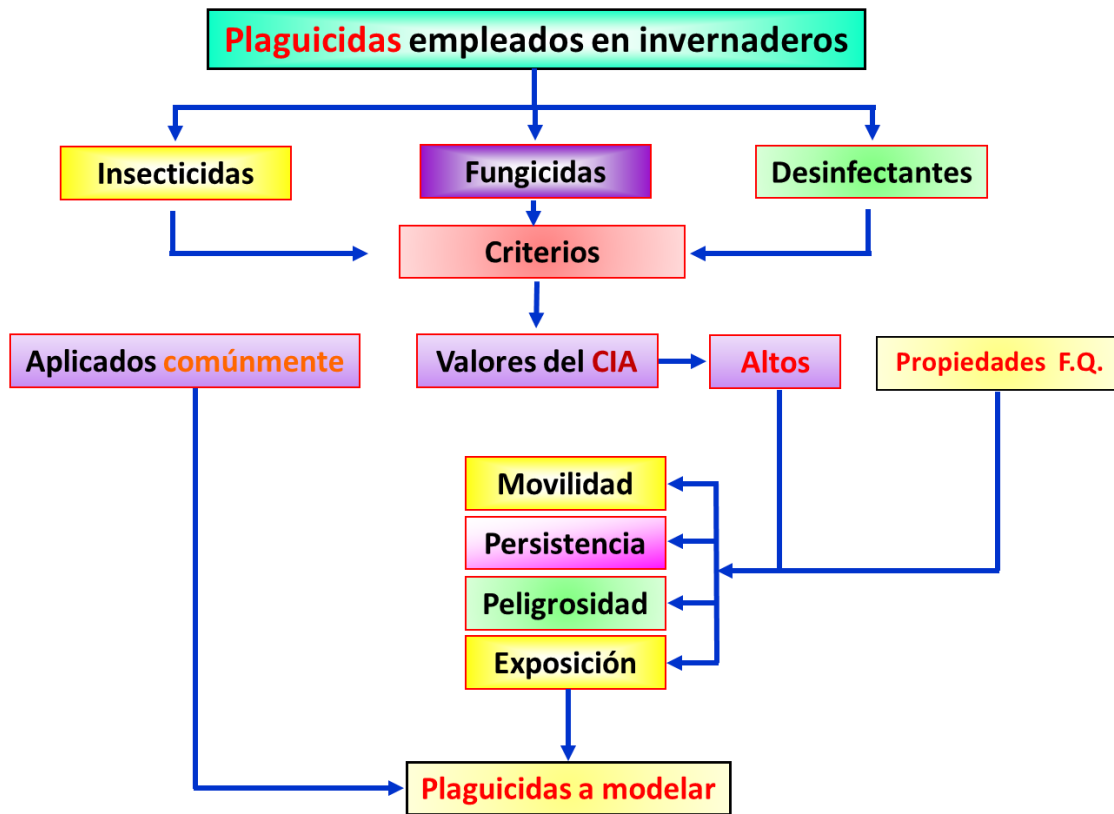


Figura 4.5. Diagrama para determinar plaguicidas a modelar

### Plaguicidas aplicados comúnmente y su repetitividad en invernaderos

Uno de los primeros criterios considerados que se tomaron en cuenta para elegir los plaguicidas a modelar, fue la repetitividad de los plaguicidas aplicados en los invernaderos, para lo cual, en primera instancia, se elaboró una tabla para registrar los plaguicidas más comúnmente empleados en cada uno de los tres invernaderos, para así, identificar cuáles son los que más se repetían en los tres invernaderos.

### Cálculo del CIA de los plaguicidas

A partir del conocimiento de los plaguicidas que comúnmente fueron empleados en los invernaderos, se realizó, el cálculo del CIA (Kovach *et al.*, 1992) empleando datos bibliográficos y de campo (Tecupetla, 2014). El esquema de la figura 4.6 describe el método aplicado para estimar el CIA (Kovach *et al.*, 1992) para elegir a los plaguicidas a analizar. El cálculo se hizo aplicando la ecuación 2.11 descrita anteriormente.



Así mismo, para tener un conocimiento más amplio de estos plaguicidas se les clasifico, de acuerdo al grupo químico al que pertenecen y por el tipo de organismo que atacan o controlan.



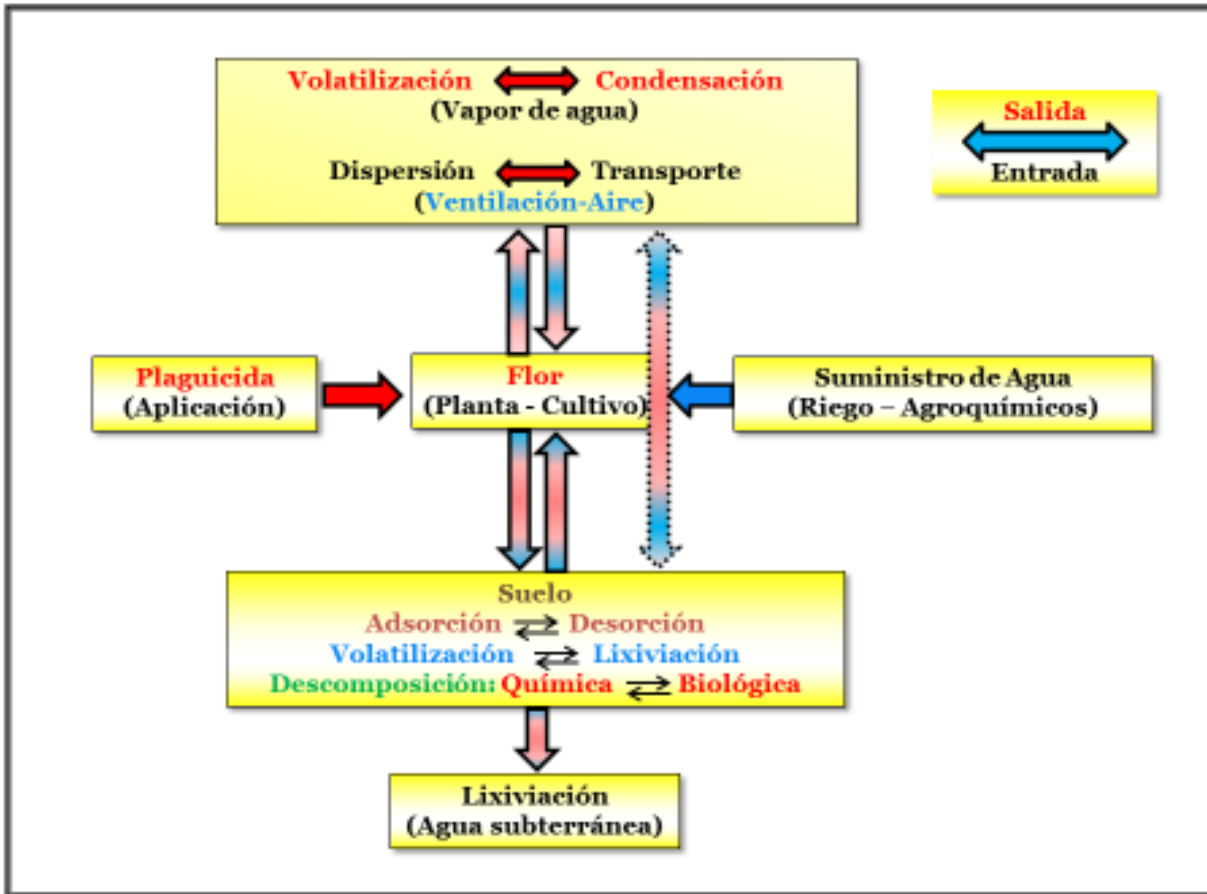
*Figura 4.6. Estimación del CIA de plaguicidas empleados en invernaderos.*

### **Elección de invernadero para estudio**

Para determinar y elegir el invernadero de estudio se realizó un análisis en el cual se tomó en cuenta la factibilidad de los productores para proporcionar información respecto a las actividades realizadas cotidianamente en la producción de la Gerbera, es decir que permitirían la accesibilidad para ingresar continuamente al invernadero e instalar equipos en su invernadero, para tomar muestras y emplear los plaguicidas a modelar en su invernadero en el momento que sea requerido.

#### **4.5.1 Análisis de movilidad de plaguicidas en un sistema cerrado**

El diagrama de la figura 4.7 muestra el esquema de los principales procesos de la movilidad de los plaguicidas en un sistema cerrado (invernadero), a partir de su aplicación en los cultivos (flor) y la interacción con los componentes del medio que los rodea. De forma general, se muestran los elementos básicos requeridos, que se deben tomar en cuenta para la modelación de la movilidad de la contaminación por plaguicidas en la ZNS.



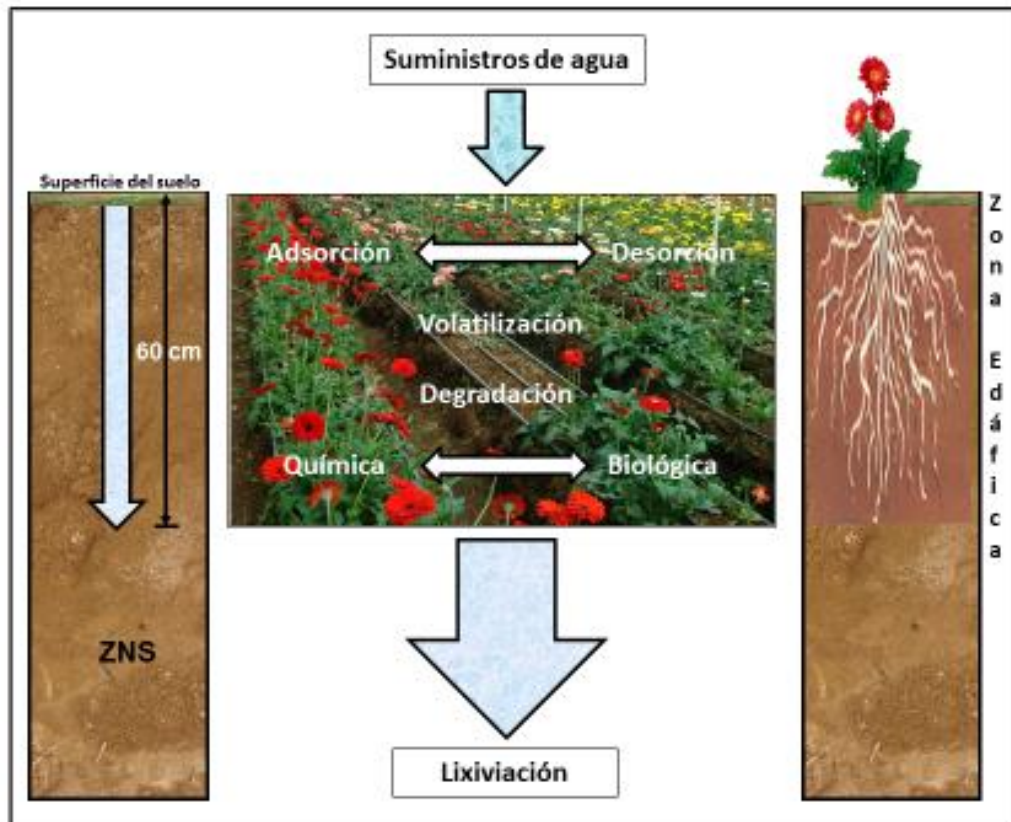
**Figura 4.7.** Movilidad de plaguicidas en un sistema cerrado a partir de su aplicación.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.2 Principales procesos de movilidad de plaguicidas en la ZNS

La figura 4.8 describe los principales procesos que se presentan durante la movilidad de los plaguicidas en la ZNS una vez que estos se han depositado en el suelo. El primer proceso que se presenta de forma inmediata, es la adsorción en las partículas del suelo y en la materia orgánica (MO) presente. Posteriormente, se da la volatilización de una fracción del plaguicida que se encuentra ya incorporado en el suelo, la cantidad que se volatiliza depende de sus propiedades fisicoquímicas de éste (presión de vapor, vida media, solubilidad en el agua, entre otras) y de las condiciones climatológicas prevalecientes del lugar. Posteriormente, se presenta la degradación química-biológica por efecto del contenido de humedad, acidez y por los microorganismos presentes en el suelo, etc. El proceso de lixiviación en el suelo es atribuido a

la infiltración del agua aplicada durante los riegos la cual contienen agroquímicos y plaguicidas, siendo el medio de transporte de los contaminantes hacia el agua subterránea (acuíferos).

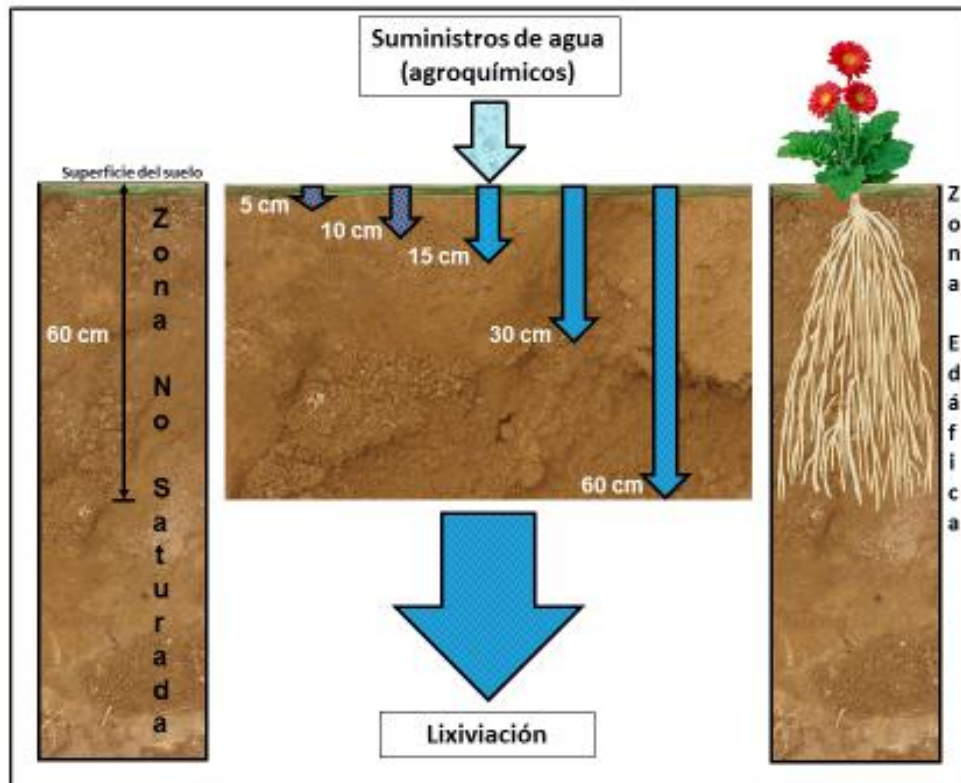


**Figura 4.8.** Diagrama de procesos y movilidad de los plaguicidas en la ZNS.

El suministro de agua en áreas de cultivos abiertos ocurre por la presencia de las lluvias de temporal y a los riegos, mientras que, en áreas de cultivos cerrados, ocurre durante los riegos por goteo y la aplicación de agroquímicos (fertilizantes y plaguicidas).

Se determinó esta zona de estudio porque: es la primera barrera a la que se enfrentan los contaminantes antes de dirigirse hacia zonas más profundas del suelo pudiendo alcanzar los acuíferos (agua subterránea). Además, por ser la zona más activa en retención, degradación (transformación) y de movilidad de estos. La profundidad determinada para el estudio se debe al alcance radicular de la planta de Gerbera, que es de alrededor de los 60 cm. Partiendo de lo antes mencionado, se estableció trabajar en la zona edáfica, para lo cual se subdividió en capas. Donde, se le llamó capa 1 a la que está en un rango de 0 a 5 cm de profundidad, las

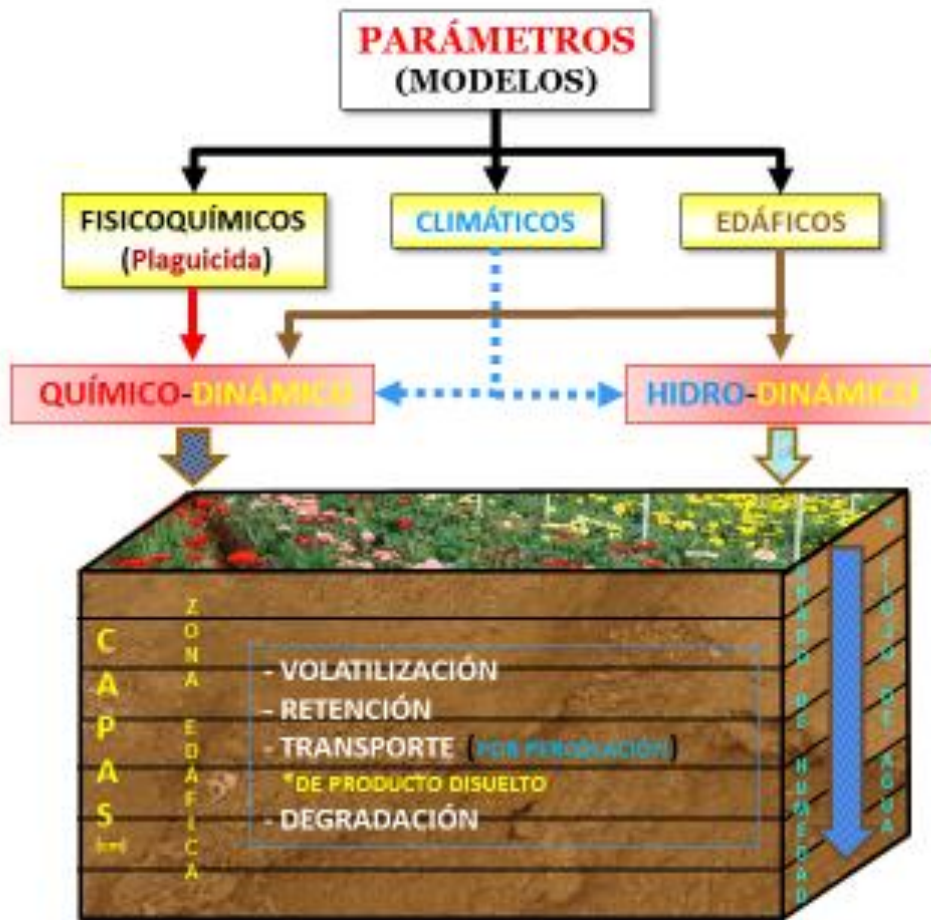
siguientes capas fueron a 10, 15, 30 y 60 cm (capas 2, 3, 4 y 5 respectivamente) posteriores a la capa 1, tal como se muestra en la figura 4.9.



*Figura 4.9. Diagrama de capas para analizar la movilidad de los plaguicidas en la ZE (ZNS).*

### 4.5.3 Balance de plaguicidas en el suelo

La figura 4.10 describe dos modelos dinámicos: hídrico y químico, que ejemplifican la movilidad de los plaguicidas en el suelo y los parámetros que intervienen durante el proceso, explicando de forma separada y simplificada como es que se da cada uno de ellos intervienen, aunque, estos procesos se dan de forma paralela. Sin embargo, la forma de cuantificar la movilidad de los plaguicidas en la ZE, es a través de la aplicación de un balance de estos después de ser empleados en un cultivo. Las ecuaciones 4.1 y 4.2 representan una forma de cálculo del balance de plaguicidas en las distintas capas del suelo (Caballero, 1986):



**Figura 4.10.** Modelos dinámicos: hídrico y químico de movilidad de plaguicidas en el suelo.

Para la capa 1 (superficie del suelo):

$$C(t) = C(t-1) + C_x(t) - C_d(t) - C_v(t) - C_a(t) - R_s(t) \quad (4.1)$$

Para las capas subsiguientes (2 a 5) a través de la ecuación 4.2:

$$C(t) = C(t-1) + C_x(t) - C_d(t) - C_a(t) - R_s(t) \quad (4.2)$$

Dónde:

$C(t)$  = Concentración total de plaguicida en la capa el día  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$C(t-1)$  = Concentración de plaguicida en el suelo antes de otra aplicación el día  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$C_x(t)$  = Cantidad de plaguicida agregado el día  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$C_d(t)$  = Cantidad de plaguicida degradado el día  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$C_v(t)$  = Cantidad de plaguicida volatilizado el día  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$C_a(t)$  = Cantidad de plaguicida adsorbido por el suelo el día  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$R_s(t)$  = Cantidad de plaguicida disuelto perdido por infiltración (lixiviado) ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Con base en el modelo descrito anteriormente, es como se efectuó el balance de plaguicidas en la ZE, debido a que integra los principales procesos que ocurren en el suelo; de aplicación de plaguicidas: retención, volatilización, transporte por percolación y degradación del producto. Además, de los parámetros fisicoquímicos requeridos en cada uno de estos procesos.

### Cálculo de las variables

Degradación del plaguicida en el suelo:

La cantidad de plaguicida degradado en el suelo se calcula como:

$$C_d(t) = C(t-1)(1 - e^{-\lambda''t}) \quad (4.3)$$

Dónde:

$C_d(t)$  = Cantidad de plaguicida degradado ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$C(t-1)$  = Cantidad total de plaguicida en el suelo al comienzo del día ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$\lambda''$  = Constante de velocidad de degradación del plaguicida a la  $T_m$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) y  $\text{pH}''$  ( $\text{día}^{-1}$ ).

$t = 1$  día.

Para corregir la constante de la velocidad de degradación del plaguicida, se aplica la Ley de Arrhenius (ecuación 4.4), de tal forma que para la corrección por temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) del suelo.

$$\lambda = A \cdot e^{E_a/RT} \quad (4.4)$$

A la temperatura media  $T_m$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) del día  $t$ .

$$\lambda' = A \cdot e^{E_a/RT} \quad (4.5)$$

Dividiendo ambas expresiones anteriores y despejando  $\lambda'$  se tiene:

$$\lambda' = \lambda \exp \frac{E_a}{R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right] \quad (4.6)$$

Dónde:

$\lambda'$  = Constante de velocidad de degradación del plaguicida corregida por temperatura ( $\text{día}^{-1}$ ).

$\lambda$  = Constante de velocidad de degradación del plaguicida de primer orden, determinado experimentalmente a la temperatura T ( $^{\circ}$ K) y a un pH ( $\text{día}^{-1}$ ).

$E_a$  = Energía de activación (cal /mol) de las reacciones de descomposición.

R = Constante universal de los gases (1.99 cal /mol  $^{\circ}$ K).

$T_m$  = Temperatura media diaria del suelo ( $^{\circ}$ K).

T = Temperatura a la que  $\lambda$  fue determinada ( $^{\circ}$ K).

Corrección de  $\lambda'$  por pH del suelo:

$$\lambda'' = \lambda' B^{(pH'' - pH)} \quad (4.7)$$

Dónde:

$\lambda''$  = Constante de velocidad de degradación del plaguicida corregida por pH ( $\text{día}^{-1}$ ).

$\lambda'$  = Constante de velocidad de degradación del plaguicida corregida por T del suelo ( $\text{día}^{-1}$ ).

B = Constante con valor de 2.5.

$pH''$  = pH del suelo.

$pH$  = pH al que fue determinado  $\lambda'$ .

Cambio neto en la concentración del plaguicida debido al transporte

La tasa de pérdida del plaguicida por volatilización se calcula por la siguiente ecuación como:

$$Cv(t) = \frac{2p_p \sqrt{M_p} \times (C_w)_v}{p_w \sqrt{M_w}} \quad (4.8)$$

Dónde:

$Cv(t)$  = Tasa de volatilización del plaguicida ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \text{día}$ ).

$P_p$  = Presión de vapor del plaguicida que varía dentro del rango normal de temperatura ambiente aproximadamente, en un 5% /  $^{\circ}$ C (mm de Hg).

$P_w$  = Presión de vapor del agua a la temperatura considerada (mm de Hg.).

$M_p$  = Peso molecular del plaguicida (g/mol).

$M_w$  = Peso molecular del agua (g/mol).

$(C_w)_v$  = Pérdida del agua por evaporación por unidad de superficie ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Cálculo del coeficiente de adsorción Freundlich:

$$k_f = 8.02 \times 10^{10} \frac{S_w^{-1,397}}{e^{0,031[P]}} \cdot M_o^{0,915} \quad (4.9)$$

Dónde:

$k_f$  = Coeficiente de adsorción de Freundlich ( $\mu\text{g/g suelo/cm}^3 \text{ agua}$ ).

$S_w$  = Solubilidad del plaguicida en agua (mol/mL).

[P] = Paracoro del plaguicida que es un índice teórico del volumen molar del plaguicida y corresponde al volumen de un mol cuando su tensión superficial es la unidad.

$M_o$  = Porcentaje de materia orgánica en el suelo.

La concentración de plaguicida en solución se puede calcular mediante la ecuación de Leistra y Dekkers (1977):

$$C_{s(t)} = \frac{C_i}{\theta + \rho \cdot k_p} \approx \frac{C(t-1)}{\theta + \rho \cdot K_f} \quad (4.10)$$

Dónde:

$C_s(t)$  = Concentración de plaguicida en solución ( $\mu\text{g/cm}^3$ ).

$C(t-1)$  = Cantidad total del plaguicida en el suelo al principio del día ( $\mu\text{g/cm}^3$ ).

$\theta$  = Fracción volumétrica de agua en el suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

$\rho$  = Densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ).

$K_f$  = Coeficiente de adsorción ( $\mu\text{g/g suelo/cm}^3 \text{ agua}$ ).

Plaguicida adsorbido en el suelo ( $C_a(t)$ ):

$$C_a(t) = \rho \cdot k_f \cdot C_s(t)^{1/n} \quad (4.11)$$

Dónde:

$C_a(t)$  = Cantidad de plaguicida adsorbido en el suelo ( $\mu\text{g/cm}^3$ ).

$K_f$  = Coeficiente de adsorción ( $\mu\text{g/g suelo/cm}^3 \text{ agua}$ ).

$\rho$  = Densidad aparente del suelo ( $\text{g/cm}^3$ ).

$C_s(t)$  = Concentración de plaguicida en solución ( $\mu\text{g/cm}^3$ ).

$1/n = 0.693 / t_{1/2}$ .

$t_{1/2}$  = Tiempo de vida media del plaguicida (día).

Pérdida de plaguicida por lixiviación (infiltración):



$$R_s(t) = C_s(t) \cdot \theta r \quad (4.12)$$

Dónde:

$R_s(t)$  = Pérdida del plaguicida en fase líquida por  $\text{cm}^3$  de suelo ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$C_s(t)$  = Concentración de plaguicida en solución ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$\theta r$  = Volumen de agua infiltrado (lixiviado) ( $\text{cm}^3$ ).

$\theta$  = Fracción de agua infiltrado (lixiviado).

#### 4.5.1 Variables requeridas para el balance de plaguicidas

Una vez obtenidas todos los componentes de la ecuación del balance de plaguicidas, se realizó un listado de las variables requeridas para el modelado de los plaguicidas en la zona edáfica. La tabla 4.1 muestra las variables requeridas.

**Tabla 4.1** Variables requeridas de campo y literatura, para la modelación

Variable	Descripción
$P_p$	Presión de vapor del plaguicida.
$P_p'$	Corrección de $P_p$ por cambio de temperatura.
$P_w$	Presión de vapor del agua a la temperatura de invernadero.
$M_p$	Peso molecular del plaguicida.
$M_w$	Peso molecular del agua.
$(C_w)_v$	Pérdida de agua por evaporación por unidad de superficie.
$\Theta$	Fracción volumétrica de agua en el suelo.
$P$	Densidad aparente del suelo.
$K_f$	Coefficiente de partición sólido/líquido.
$S_w$	Solubilidad del plaguicida en el agua.
$[P]$	Volumen molar del plaguicida.
$M_o$	Porcentaje de materia orgánica.
$\Theta_r$	Volumen de agua percolado.
$\lambda''$	Constante de velocidad a la temperatura media diaria del suelo ( $T_m$ ) y $\text{pH}''$ .
$\Lambda$	Constante de velocidad de degradación de primer orden determinado experimentalmente a la temperatura $T_m$ y a un $\text{pH}$ .
$E_a$	Energía de activación de descomposición del plaguicida.

**Tabla 4.1** Variables requeridas de campo y literatura, para la modelación (continuación)

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
R	Constante Universal de los gases.
T <sub>m</sub>	Temperatura media diaria del suelo.
T	Temperatura a la que $\lambda$ fue determinado.
$\lambda'$	Constante de velocidad de degradación corregida por temperatura.
pH"	pH del suelo.
pH	pH al que fue determinado $\lambda$ .
B	Constante de velocidad por cada unidad que se incrementa el pH.
C'	Cantidad total del plaguicida en el suelo al principio del día.

Las variables requeridas para el modelado presentadas en la tabla 4.1, permitieron hacer una clasificación y análisis, de cuales serían obtenidas a través de revisión bibliográfica y cuales a través del trabajo de campo, tal como se muestra de forma esquemática en la figura 4.11:

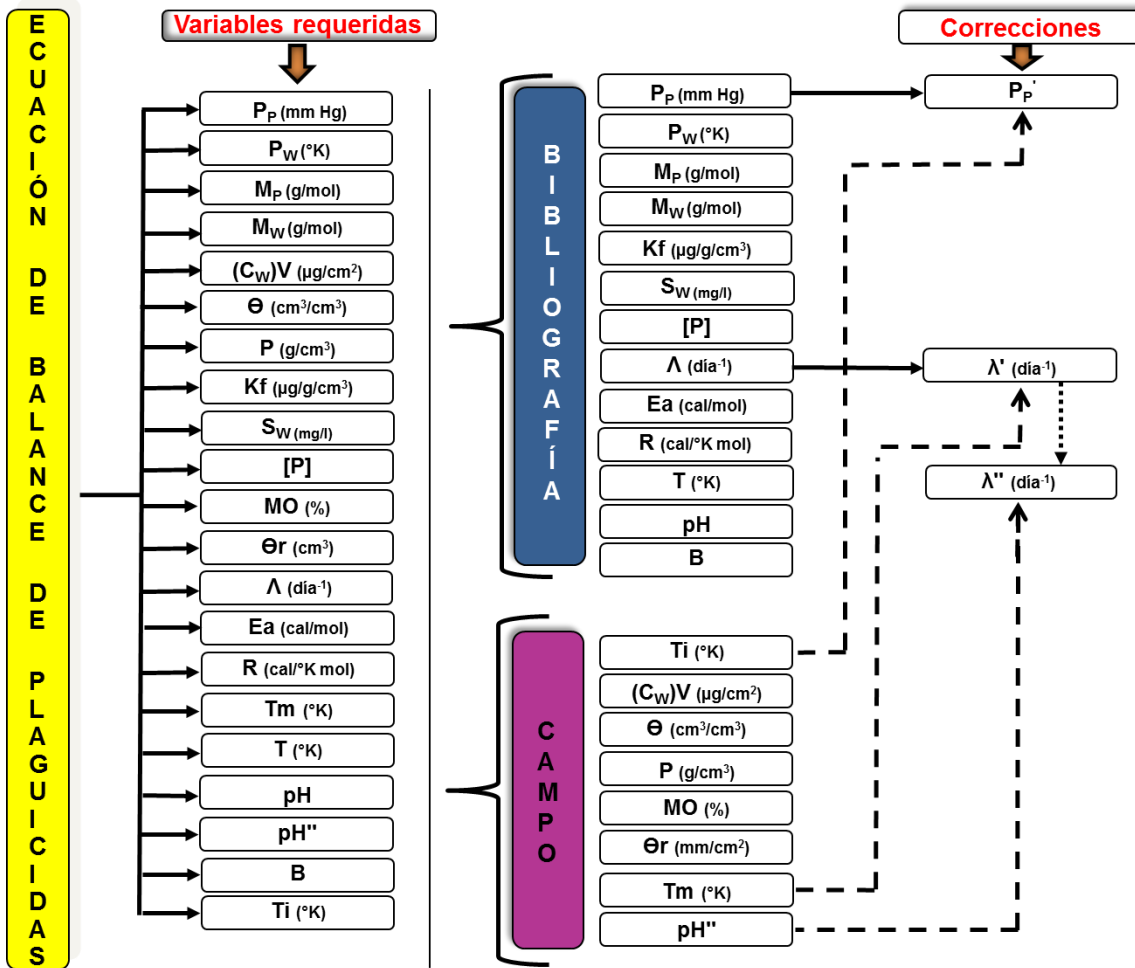


Figura 4.11. Variables requeridas para la movilidad de los plaguicidas en la ZNS.

#### 4.5.2 Variables de campo requeridas del área de estudio

La figura 4.12 muestra los métodos y equipos para determinar las variables requeridas de campo.

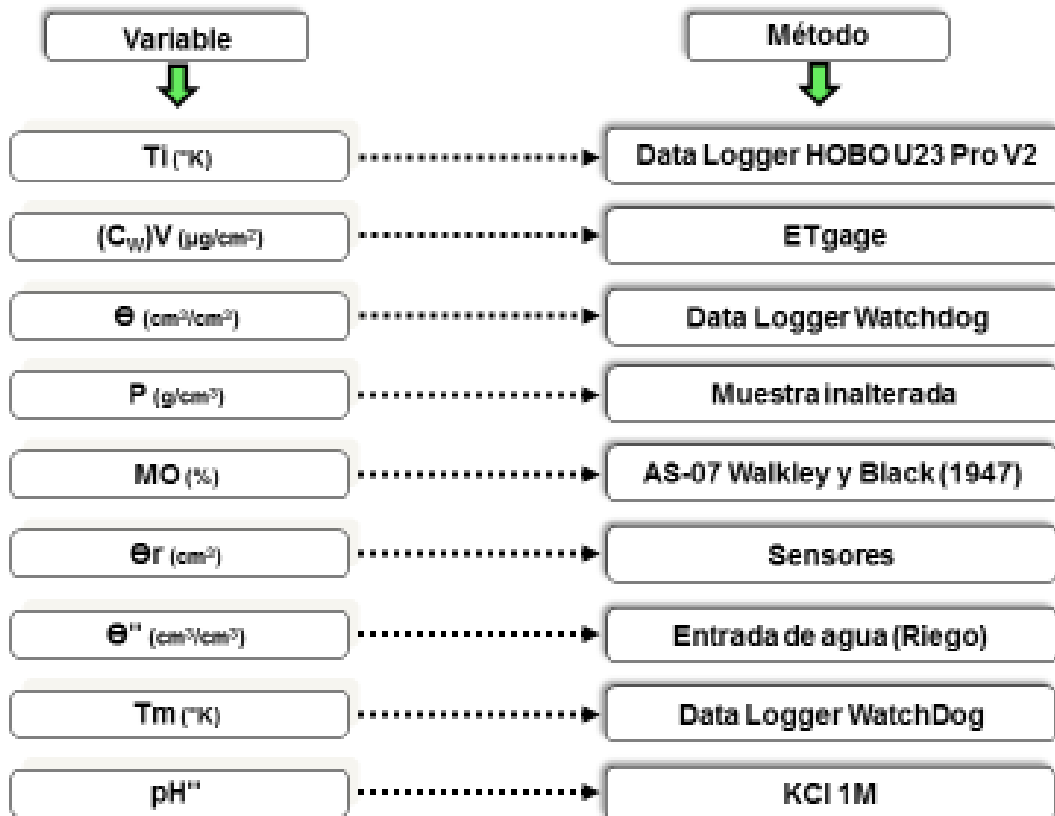


Figura 4.12. Métodos y equipos para determinar las variables de campo.

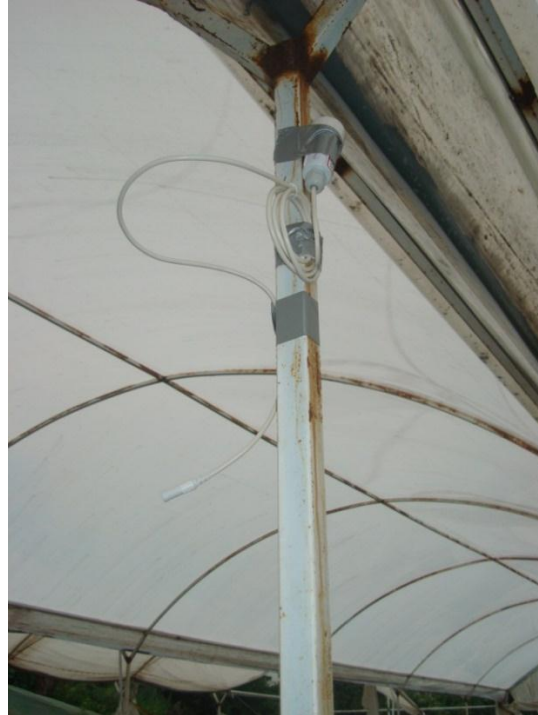
### Cantidad y concentración de plaguicidas aplicados

Para obtener información respecto a la cantidad, concentración de plaguicidas aplicados en los cultivos de flor en invernadero, fue necesario realizar varias entrevistas con los dueños de invernaderos, en especial con el dueño del invernadero en el que se realizó el estudio, para recabar la información requerida.

### Temperatura ambiente

Para tener bases de datos y registros de la temperatura ambiental prevaleciente dentro del invernadero, se realizó por medio de la instalación de dos sensores Data Logger HOBO U23 Pro v2, tal como se observa en la figura 4.13. Estos sensores permitieron registrar, la temperatura ambiental y el porcentaje de humedad relativa de forma automática. La manera de

cómo estos equipos fueron distribuidos espacialmente dentro del invernadero se puede observar en la figura 4.16.



**Figura 4.13.** Sensor HOBO U23 Pro v2 instalado en el sitio experimental.

### **Evaporación de agua**

Se instaló un equipo Etagage de la marca Spectrum Technologies para registrar la evapotranspiración del cultivo de flor Gerbera, con una lona de capucha que simula la evapotranspiración de un cultivo de alfalfa (Figura 4.14). El equipo tiene la capacidad de registrar los datos de evapotranspiración de forma automatizada. Su instalación dentro del invernadero se hizo a una altura de 1.2 metros del suelo en la parte central de éste, fue fijado de forma vertical a un tubo con cinta canela y posteriormente, se llenó con agua destilada hasta nivel cero del medidor del contenedor. Las variaciones (descensos) que se observaron con el transcurso del tiempo (días) fueron debido a la evaporación (mm) que había dentro del invernadero, los cuales se registraban en una libreta periódicamente (cada semana). Cabe mencionar que, al equipo se le daba mantenimiento y era nuevamente llenado con agua destilada periódicamente, con el fin de preservar su buen funcionamiento.



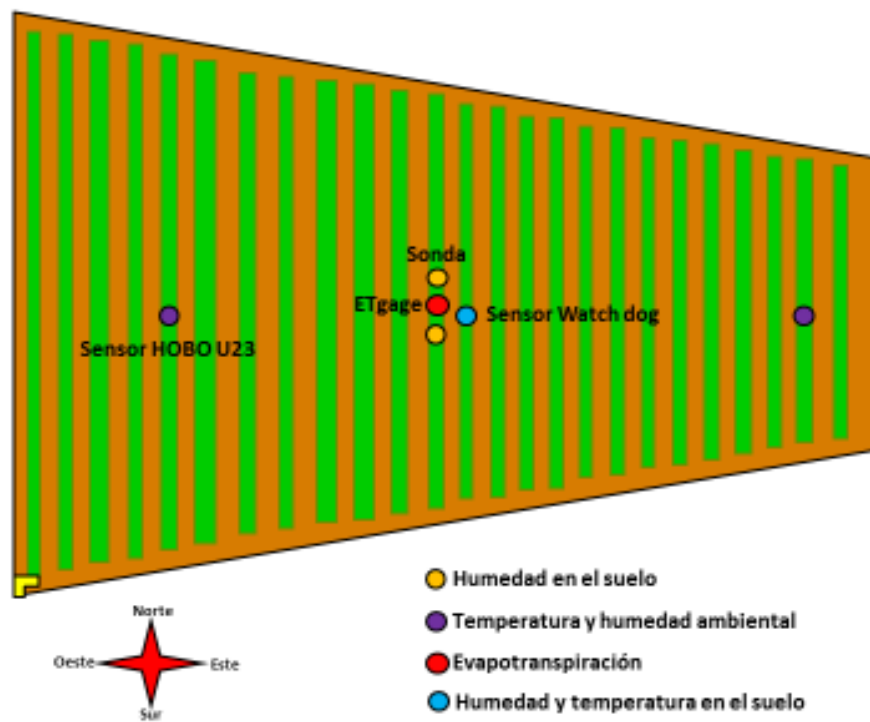
**Figura 4.14.** *Evaporímetro Etagage instalado en el invernadero.*

### **Estimación del comportamiento de la temperatura y humedad del suelo**

Las variaciones de temperatura y humedad de suelo del invernadero, se registraron a través de un equipo de estación meteorológica Watchdog 1000 colocado en medio del invernadero (Figura 4.15), el cual cuenta con 4 sensores. Debido a la poca disponibilidad de equipos, sólo se contaba con un equipo, por lo que se decidió instalar a dos profundidades 15 y 60 cm (humedad y temperatura). Los datos registrados se almacenaron de forma automática en la memoria interna del equipo y que posteriormente, se fueron descargando en una PC para el análisis de datos.



**Figura 4.15.** Estación meteorológica Watchdog.



**Figura 4.16.** Ubicación espacial de los equipos colocados en el invernadero de estudio.

## **Caracterización del suelo del invernadero**

### **Determinación de la densidad aparente del suelo**

La densidad aparente del suelo se define como: masa del suelo seco/volumen total del suelo. Existen diferentes métodos para su determinación, entre los cuales se encuentran el de: cilindro, excavación y aspersion de rayos gamma, para el trabajo de investigación se utilizó el método del cilindro con muestreadores para cilindro.

Método de la muestra inalterada: este método es muy práctico, para el cual, se requiere una barrena para la toma de muestras inalteradas, pala, cilindros para la determinación de humedad (Serrato y Landeros, 2001; Blake, 1965).

#### **Procedimiento**

Introducir o presionar el muestreador en el suelo. Esto se puede llevar acabo de forma vertical en la superficie del suelo, como en forma horizontal a las paredes del perfil. Sacar cuidadosamente el muestreador y los cilindros interiores que contienen la muestra, de tal forma que, el cilindro se llene, del cual se desconoce el volumen, transferir la muestra así tomada a un bote para la determinación de humedad, en estufa a 105 °C.

El cálculo de la densidad aparente se llevó a cabo por la siguiente ecuación 4.13.

$$Dap = \text{Peso del suelo seco/ volumen del cilindro} \quad (4.13)$$

Dónde:

$Dap$  = Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ).

$M_o$  = Porcentaje de materia orgánica en el suelo (%).

### **Determinación de la materia orgánica del suelo**

Para determinar el contenido de materia orgánica del suelo se realizó a través del método AS-07 de Walkley y Black (1947), NOM-021 SEMARNAT 2001. El cual se le realizó a 45 muestras



de 9 puntos de muestreo (Figura 4.17) en el laboratorio de calidad del agua del CIRA de la siguiente manera:

Se pesó 0.5 g de suelo, anteriormente ya pasado por un tamiz de 0.5 mm y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 ml. Se procesó un blanco con reactivos por triplicado. Se adicionó 10 ml de  $K_2Cr_2O_7$  1N, girándolo para que la solución entre en contacto con la muestra, se le adicionó 20 ml de  $H_2SO_4$  concentrado, agitándolo por 1 minuto, se dejó reposar 30 minutos y se le adicionó 200 ml de agua destilada. Se le añadió 5 ml de ácido fosfórico concentrado  $H_3PO_4$ , posteriormente, se le adicionaron 5 gotas de indicador de difenilamina, se tituló con la disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta un punto final verde claro. El cálculo del porcentaje del carbono orgánico se realizó empleando la siguiente ecuación 4.14:

$$\% \text{ C Orgánico} = \left( \frac{B - T}{g} \right) (N) (0.39) \text{ mcf} \quad (4.14)$$

Dónde:

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml).

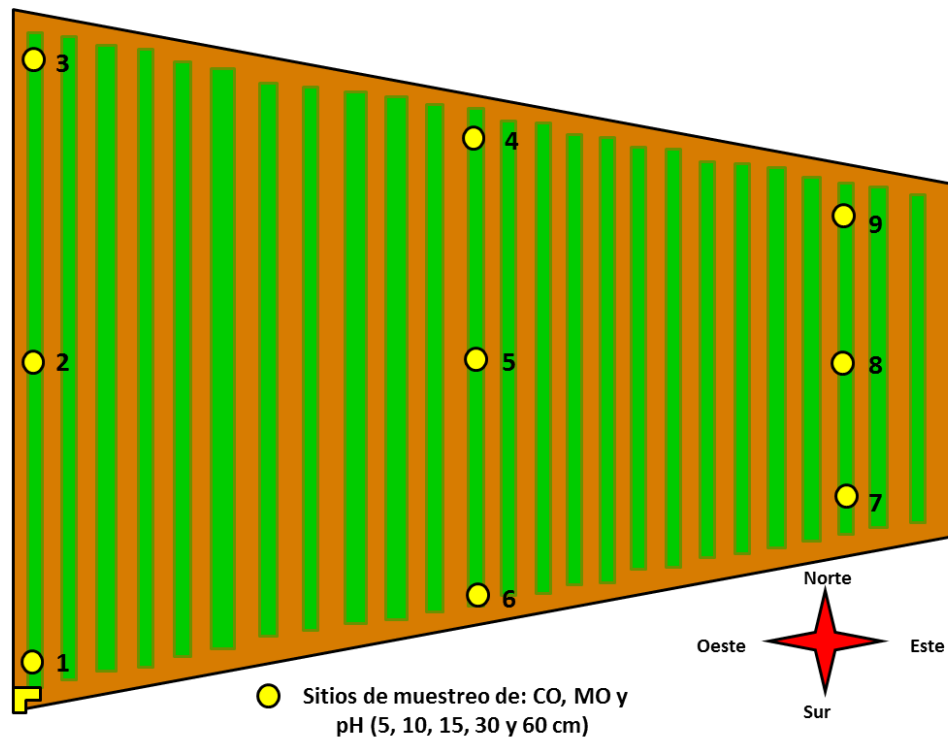
N = Normalidad exacta del sulfato ferroso (valorar por separado al momento de analizar las muestras).

g = Peso de la muestra empleada (gr).

mcf = Factor de corrección de humedad.

Para la determinación del porcentaje de materia orgánica se empleó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Materia orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724 \quad (4.15)$$



**Figura 4.17.** Distribución espacial de sitios de muestreo.

### Determinación del pH en KCl 1 M

La medición del pH del suelo es uno de los parámetros importantes en los análisis del suelo, ya que el pH controla las reacciones biológicas y químicas en el suelo, este determina la disponibilidad de nutrientes de los cultivos. Este parámetro se determinó por el método potenciométrico de acuerdo con la metodología de Serrato y Landeros (2001), este procedimiento es recomendable para suelos ácidos.

Reactivos utilizados:

Agua destilada

Solución de cloruro de potasio a una concentración 1 M.

Soluciones reguladoras de referencias 4 y 7.

Material y equipo:

Potenciómetro o medidor de pH.

Balanza

Vasos de precipitados de 50 a 100 ml.

Pipeta volumétrica de 20 ml.

Varilla de vidrio que sirva como agitador manual

Pizeta.

Tratamiento de la muestra. La muestra de suelo debe ser secada al aire y pasada por una malla de menor a 2 mm de diámetro.

Procedimiento:

Pesar 10 g. de suelo y colocarlos en el vaso de precipitados, se le adicionó 20 ml. De solución de KCl 1M.

Con una varilla de vidrio se agitó manualmente la mezcla de suelo-agua a intervalos de 5 minutos, durante 30 minutos.

Posteriormente, se dejó reposar la solución 15 minutos, mientras tanto se calibró el medidor de pH con las soluciones reguladoras pH 4, 7 y 10.

Para la toma de lectura de la muestra, se introdujo el electrodo en la parte clara y sobrenadante de la suspensión en el momento que se estabilizó la lectura.

Este procedimiento se realizó para 45 muestras, provenientes de 9 puntos en 5 capas (5,10, 15, 30 y 60). Tal como se muestra en la figura 4.18.

### ➤ **Caracterización granulométrica y física del suelo.**

Para realizar la caracterización física, la determinación de la textura y el análisis granulométrico del suelo la cual permite inferir otras propiedades del suelo, se realizó de acuerdo a la metodología de Serrato y Landeros (2001) en el laboratorio de modelos hidráulicos perteneciente al Centro Interamericano de Recursos del Agua, para ello, se utilizó una muestra compuesta de las diferentes capas del suelo del invernadero a estudiar y se efectuó de la siguiente forma:

El suelo fue secado en una estufa a una temperatura de 100 °C. Posteriormente, se tomó una muestra que se desmorono y se pesaron 500 gramos, esto se realizó con dos repeticiones, se colocó en un juego de tamices (4, 10, 20, 40, 60, 140 y 200) y puesto en la tamizadora mecánica en dos series de 5 minutos. El material retenido en cada uno de los tamices se vertió

en recipientes de aluminio previamente pesados y se volvió a pesar con la muestra. Con los pesos obtenidos se elaboró la curva granulométrica.

### **Muestreo de material**

Se tomaron tres porciones de suelo del camellón a tres diferentes profundidades (0, 30 y 60 cm), se mezclaron para homogenizar y se colocó en una superficie horizontal para permitir su secado a temperatura ambiente.

### **Análisis granulométrico:**

Una vez secado el material se procedió a realizar la granulometría de acuerdo a los siguientes pasos (Figura 4.18):

:

- a) Retiro del desperdicio mayor a 4.75 mm (malla No. 4).  
Se criba el material con la malla No. 4 con el fin de separar y eliminar los tamaños mayores a la arena.
- b) Del material pasante de la malla No. 4 se tomaron 500 g, y se tamizó utilizando las mallas Nos. 10 (2 mm), 20 (0.9 mm), 40 (0.5 mm), 60 (0.3 mm), 100 (0.2 mm) y 200 (0.08 mm), tomando nota de los porcentajes retenidos en cada una para después obtener los porcentajes que pasan.
- c) Elaboración de curvas en escala semilogarítmica de los porcentajes que pasan contra el tamaño de la partícula para obtener los coeficientes de uniformidad (Cu) y curvatura (Cc). Estos se encuentran obteniendo el tamaño de la partícula para los porcentajes que pasan igual a 10 %, 30 % y 60 %. Se aplican las siguientes expresiones:  $Cu = D_{60}/D_{30}$ ,  $Cc = ((D_{30})^2/D_{10} * D_{60})$ .
- d) Los porcentajes resultantes y los valores de los coeficientes, permiten hacer la clasificación del material tomando como referencia la M-MMP-1-02/03 del Instituto Mexicano del Transporte.



**Figura 4.18.** Análisis granulométrico.

### **Clasificación de material fino: Técnica de Bouyoucos**

Para la clasificación del material fino se realizó por el método de hidrómetro de Bouyoucos (1951), y con el empleo del diagrama de textura se clasificó el suelo, este análisis se realizó en el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la UAEM (Figura 4.19).

Material:

Balanza

Batidora Oster

Probeta de 1000 ml

Hidrómetro de Bouyoucos

Un agitador con soporte

Un cronómetro

Dos termómetros

Método:

Se pesan 50 g de suelo, desecado al aire y tamizado a través de una malla de 2 mm, al que previamente se le eliminó la materia orgánica.

Se coloca el suelo en la copa de la batidora o licuadora y se añaden 5 ml de oxalato de sodio y 5 ml de metasilicato de sodio.

Se dispersa mediante la batidora durante 10 minutos.

Se vertió el contenido en una probeta de 1 litro, arrastrando con agua de la pizeta todas las partículas. Se completa con agua destilada hasta 1 litro. Se tapa la probeta y se agita manualmente durante un minuto con movimientos verticales y continuos. Se coloca la probeta en la mesa al mismo tiempo que pone a correr el cronómetro. Se introduce el densímetro cuidadosamente dentro de la dispersión, y a los cuarenta segundos del cese de la agitación se anota y a las dos horas de terminada la dispersión.



**Figura 4.19.** Clasificación de material fino por la técnica de Bouyoucos.

### **Toma de muestras de suelo para el análisis de plaguicidas en el invernadero**

Con el objetivo de conocer las concentraciones de los plaguicidas empleados para la modelación en la ZE del suelo antes (iniciales) y después de haber sido aplicados, fue necesario llevarlo a cabo mediante la realización de dos muestreos de suelo. El perfil de la ZE de muestreo fue a 5, 10, 15, 30 y 60 cm de profundidad.

Todas las muestras de suelo se etiquetaron adecuadamente, almacenaron y transportaron en una hielera. Posteriormente, estas fueron llevadas para su análisis al laboratorio de Análisis Instrumental de la Facultad de Química de la UAEMéx. El método de análisis aplicado en las muestras de suelo para la determinación de la concentración del plaguicida fue el de cromatografía de líquidos-con detector de UV vis. El plaguicida aplicado por el agricultor y también se empleó para la modelación fue el endosulfán. La cantidad empleada fue de 200 ml. del producto comercial Talstar (bifentrina) 100 ml. los cuales se mezclaron en un tambo con 200 litros de agua para que posteriormente fueran aplicados al cultivo de flor de Gerbera.

#### 4.5 MODELACIÓN HIDROGEOMÁTICA DE PLAGUICIDAS EN LA ZE

Una vez obtenidos los datos de la bibliografía y la corrección realizada de forma pertinente de los datos que así lo requirieron, conjuntamente se analizó la información de los equipos instalados y de los obtenidos por los análisis de laboratorio, de esta forma se procedió al desarrollo de la modelación hidrogeomática del balance de plaguicidas en la ZE de la ZNS. Aquí cabe mencionar que, el plaguicida a modelar fue el endosulfán.

##### Modelación del endosulfán

En la realización del balance en la capa 1, que corresponde a la capa superficial del suelo que va de 0 a los 5 cm de profundidad de la ZE, se aplicó la ecuación 4.1. Para ello fue necesario transformar a cada una de las variables que integran la ecuación en imágenes de forma espacial y temporal, a través del software de SIG TerrSet. Todo lo anterior se realizó con el fin de poder generar y representar la modelación en forma de macromodelos.

Generación espacial y temporal de la concentración de plaguicida ( $C(t-1) = C(i)E1$ ) que había en el suelo (Figura 4.20) antes de realizarse otra aplicación de éste al cultivo el día  $t$  ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ). Es la liga de la imagen de la zona de estudio con el valor de la concentración de plaguicida en la capa. Donde el día  $t$  es igual con 1.



**Figura 4.20.** Macromodelo de generación de  $C(i)E1$ .

### Plaguicida agregado

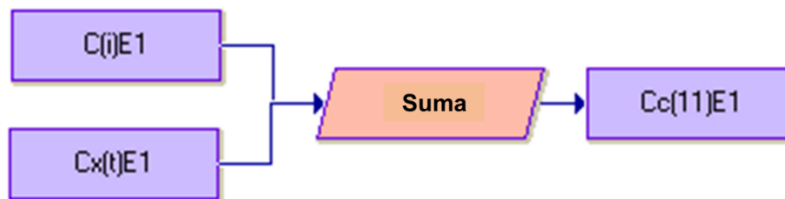
La imagen espacial y temporal de la cantidad de plaguicida agregado el día  $t$  se hizo a través del macromodelo siguiente (Figura 4.21):



**Figura 4.21.** Macromodelo de generación de  $C_x(t)E1$ .

### Plaguicida total en suelo

El plaguicida total  $C_c(11)E1$  que había en la capa del suelo representa la suma de los dos variables anteriores según el macromodelo (Figura 4.22):

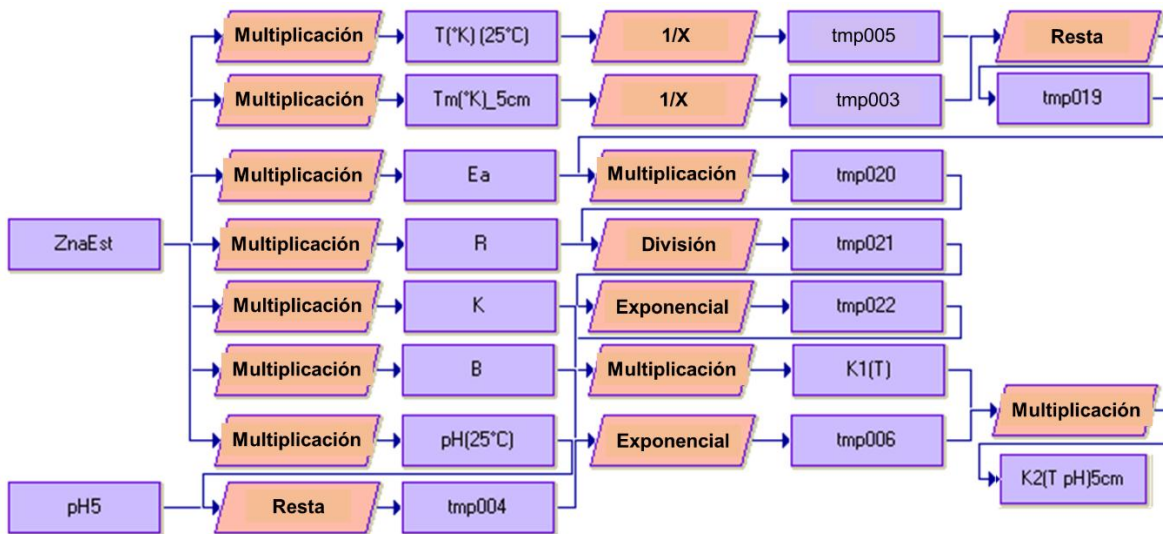


**Figura 4.22.** Plaguicida total en capa 1 del suelo.

### Plaguicida degradado

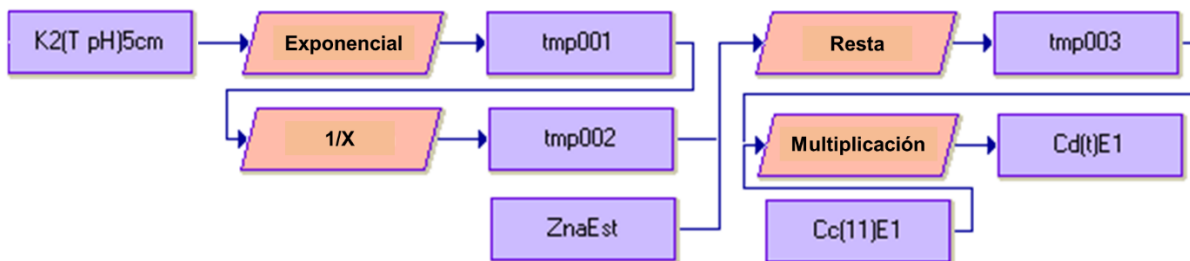
Antes de calcular el plaguicida que se ha degradado (Ecuación 4.3) se realizó primero la corrección de la constante de velocidad de degradación de éste por temperatura y pH, según las ecuaciones 4.6 y 4.7. (Figura 4.23):





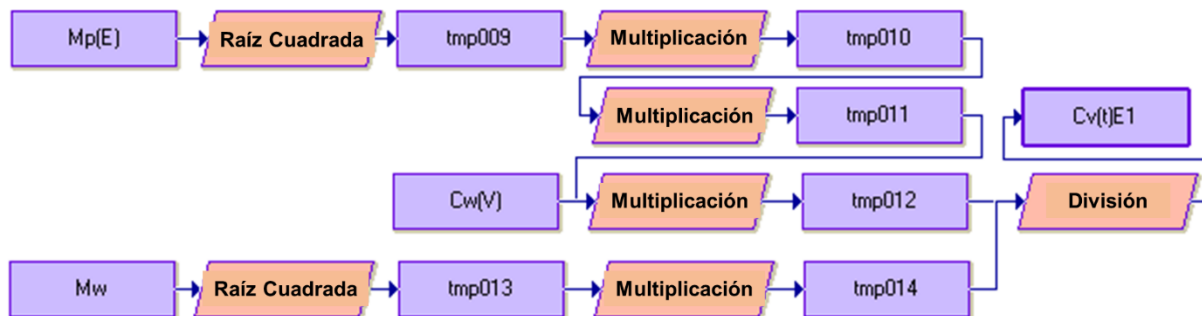
**Figura 4.23.** Corrección de la constante de la velocidad de degradación del plaguicida por T y pH.

Por lo tanto, el macromodelo de cálculo de la cantidad de plaguicida degradado es (Figura 4.24):



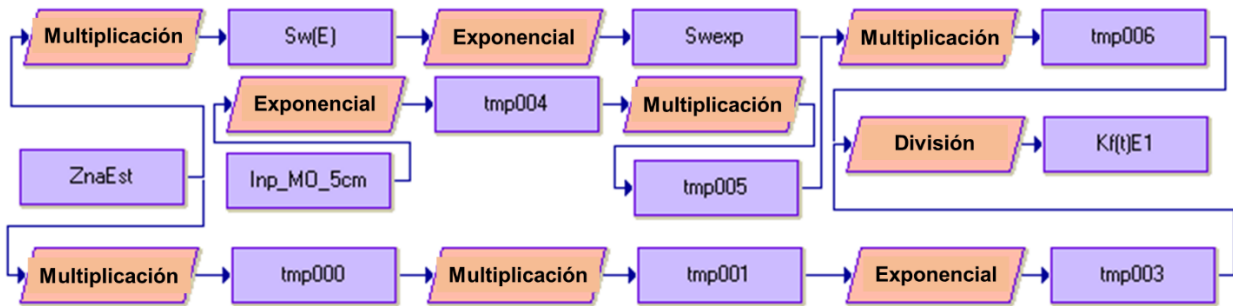
**Figura 4.24.** Cálculo del plaguicida degradado.

La pérdida de plaguicida por volatilización se calculó empleando la ecuación 4.8 (Figura 4.25) como:



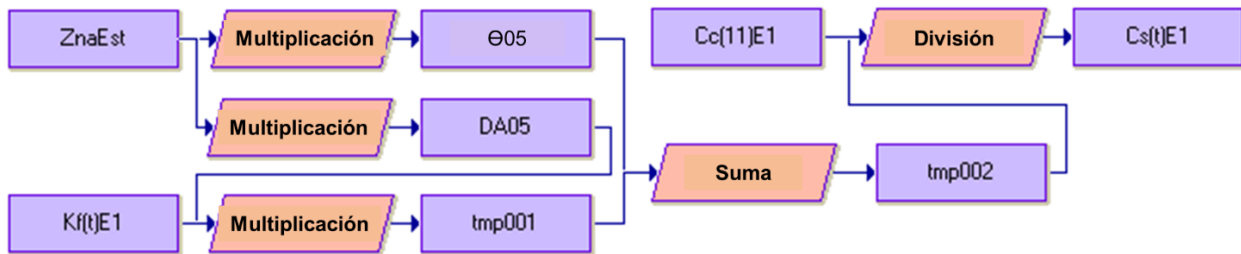
**Figura 4.25.** Pérdida del plaguicida por volatilización.

El cálculo del coeficiente de adsorción de Freundlich se realizó a través del empleo de la ecuación 4.9 (Figura 4.26):



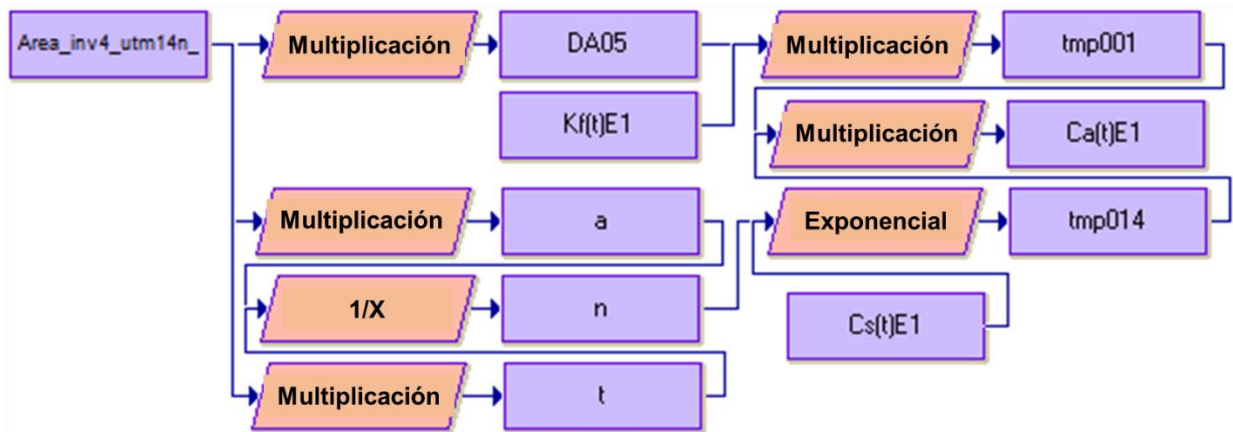
**Figura 4.26.** Macromodelo de cálculo del coeficiente de adsorción de Freundlich.

La concentración de plaguicida en solución por medio de ecuación 4.10 (Figura 4.27):



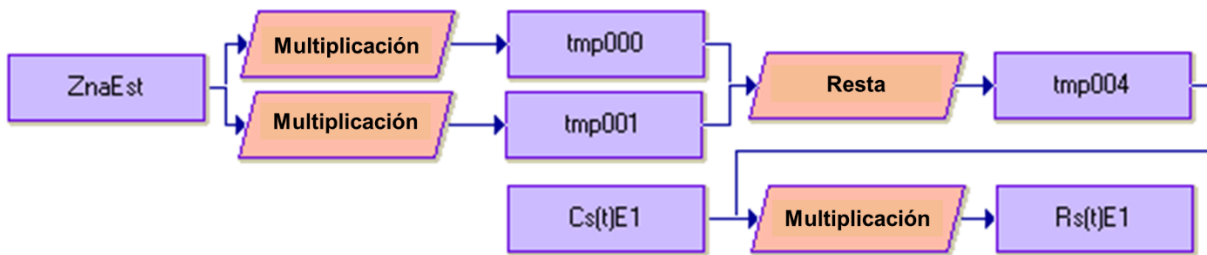
**Figura 4.27.** Cálculo del plaguicida en solución.

Mientras que, el plaguicida adsorbido en el suelo se calculó a través de la ecuación 4.11 (Figura 4.28):



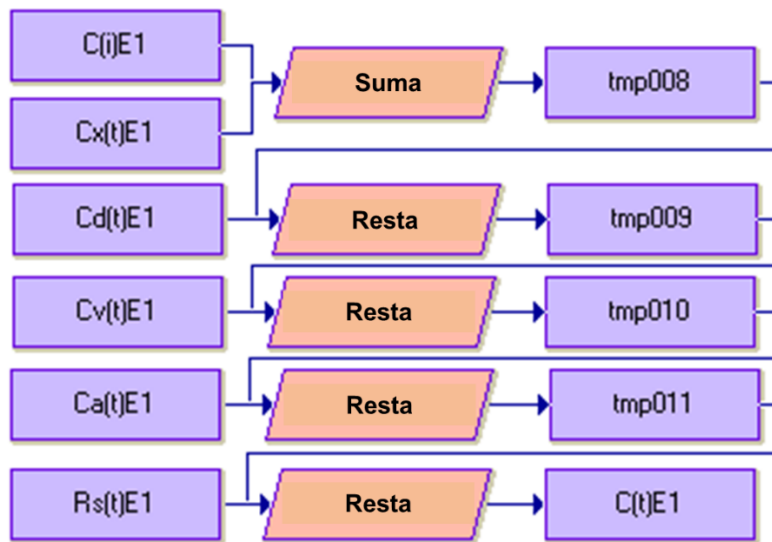
**Figura 4.28.** Cálculo del plaguicida adsorbido en el suelo.

Por otro lado, la pérdida de plaguicida por lixiviación fue estimada por medio de la ecuación 4.12 (Figura 4.29):



**Figura 4.29.** Macromodelo de cálculo de la pérdida de plaguicida lixiviado.

Por lo tanto, el balance del plaguicida en la capa 1 según la ecuación 4.1 es (Figura 4.30):



**Figura 4.30.** Balance del plaguicida en la capa 1 del suelo.

### **Balance del plaguicida en las capas subsiguientes del suelo según la ecuación 4.3.**

Debido a que, la modelación de las siguientes capas del suelo (2 a 5) tiene las mismas variables de cálculo, excepto el de la volatilización, sus respectivos macromodelos de cada una de ellas se muestran agrupados en las siguientes figuras. Esto se realizó con el fin de no repetir cada etapa de cada una de las capas. Para la corrección de la constante de velocidad de degradación del plaguicida según la capa se tiene:

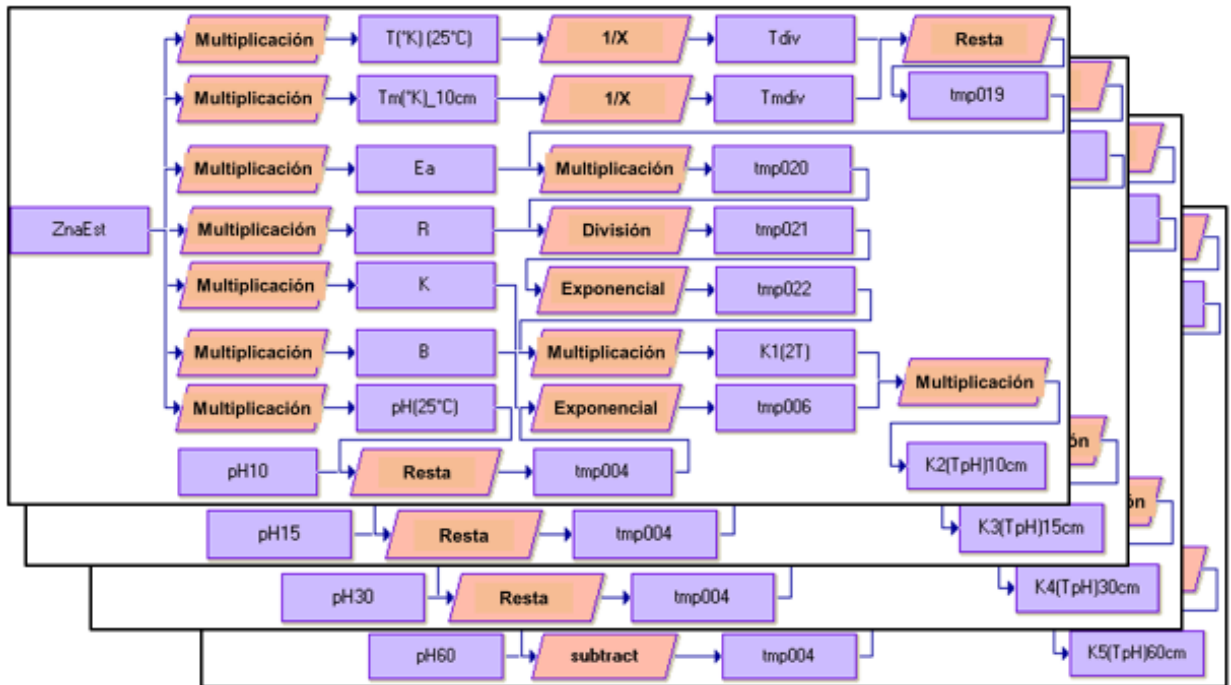


Figura 4.31. Corrección de la constante de la velocidad de degradación por capa (2 a 5).

Para la cantidad de plaguicida degradado en cada una de las capas:

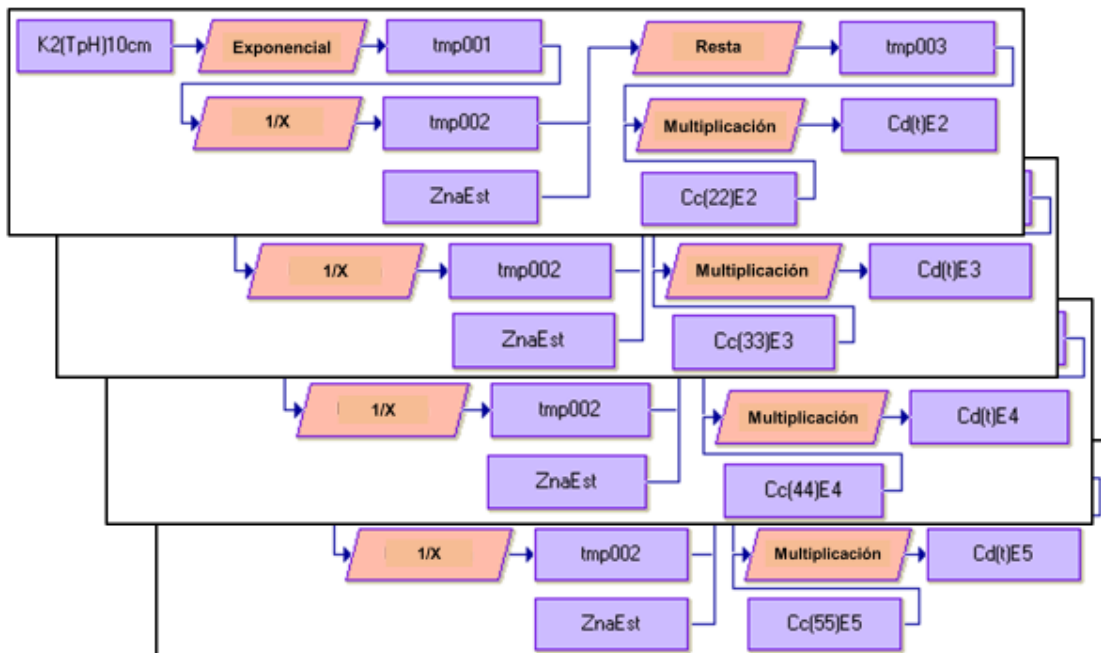


Figura 4.32. Degradación del plaguicida en las capas del suelo.

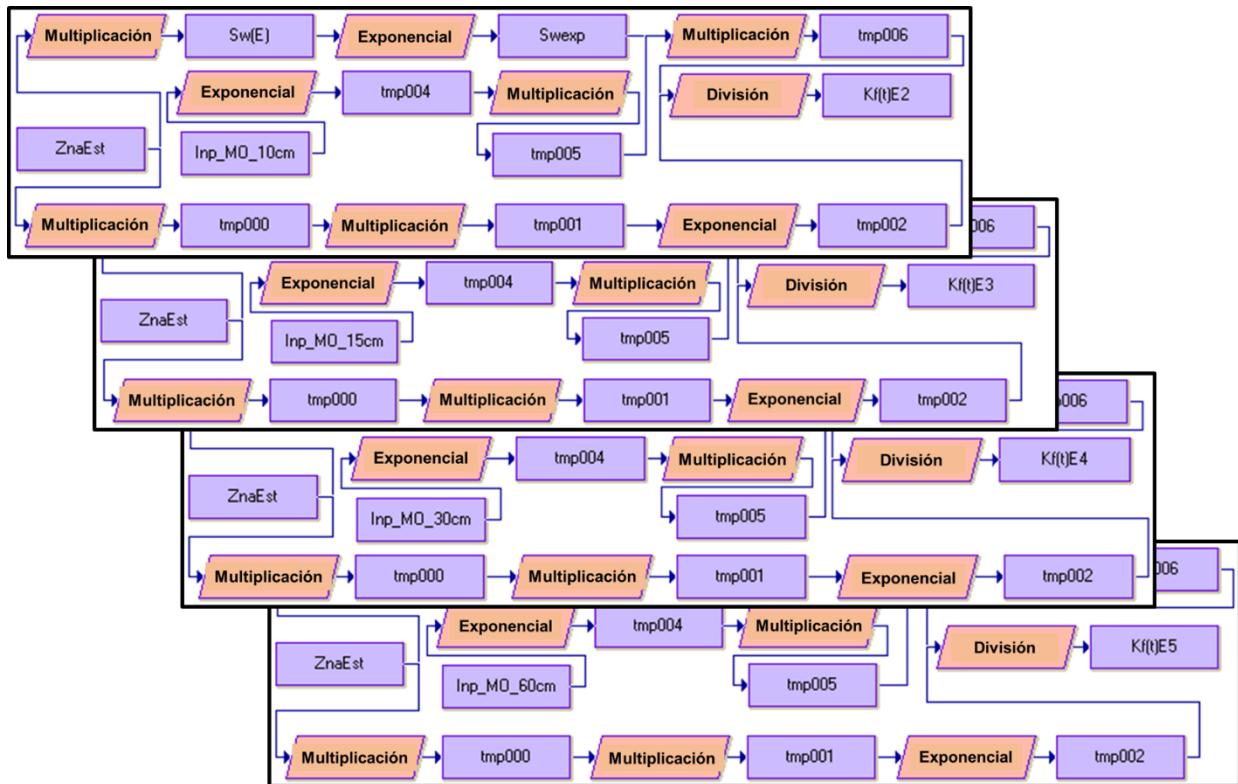


Figura 4.33. Cálculo del coeficiente de adsorción Freundlich.

En la concentración de plaguicida en solución que se encuentra disuelto en cada una de las capas del suelo.

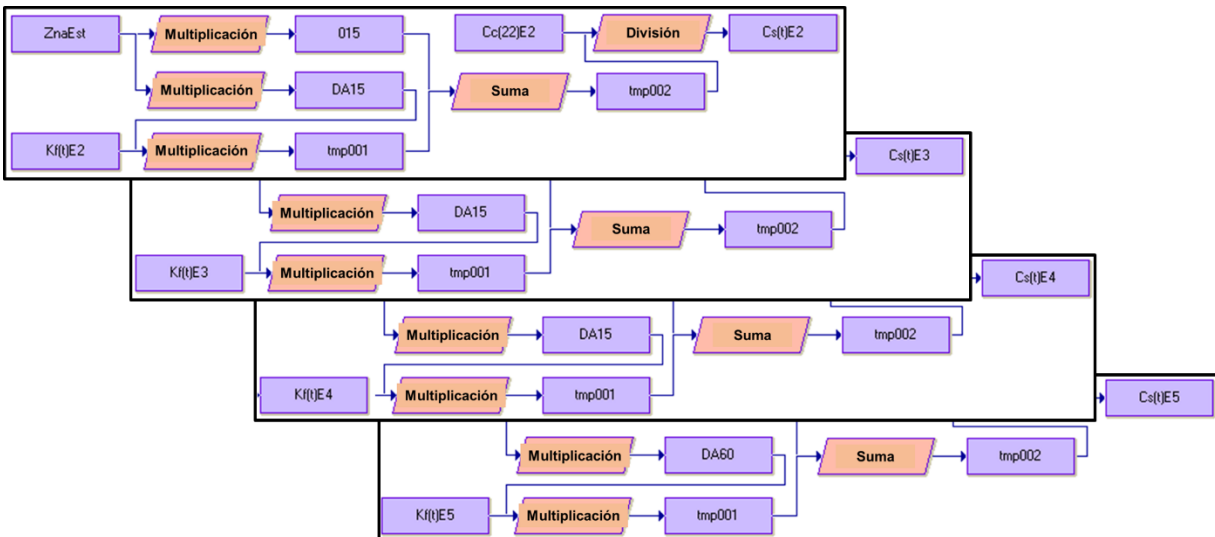


Figura 4.34. Concentración del plaguicida disuelto en solución en el suelo.

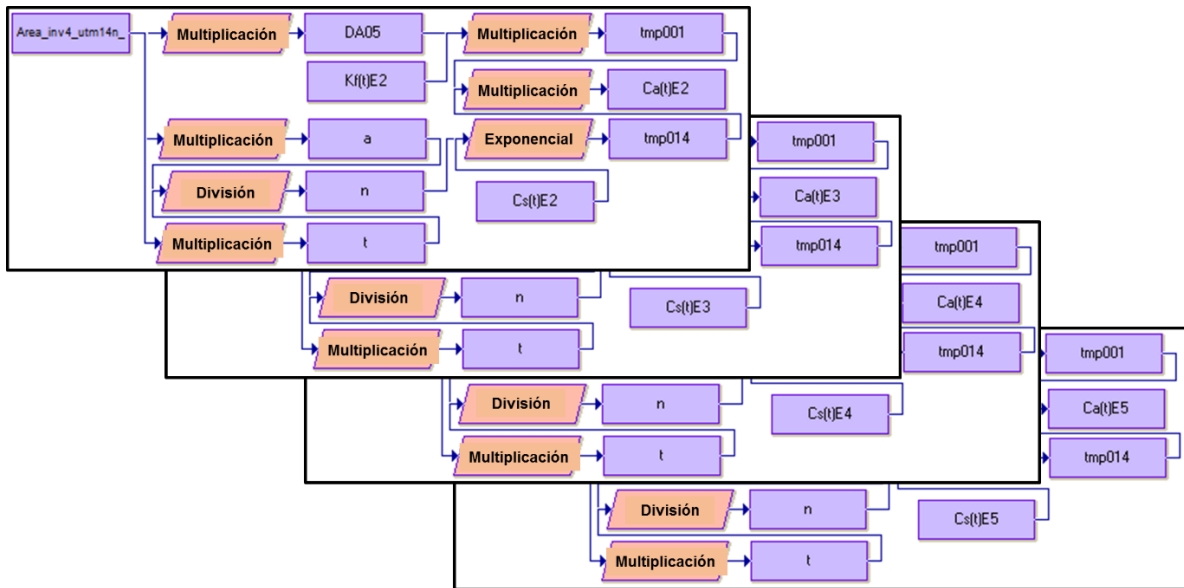


Figura 4.35. Plaguicida adsorbido en las capas del suelo.

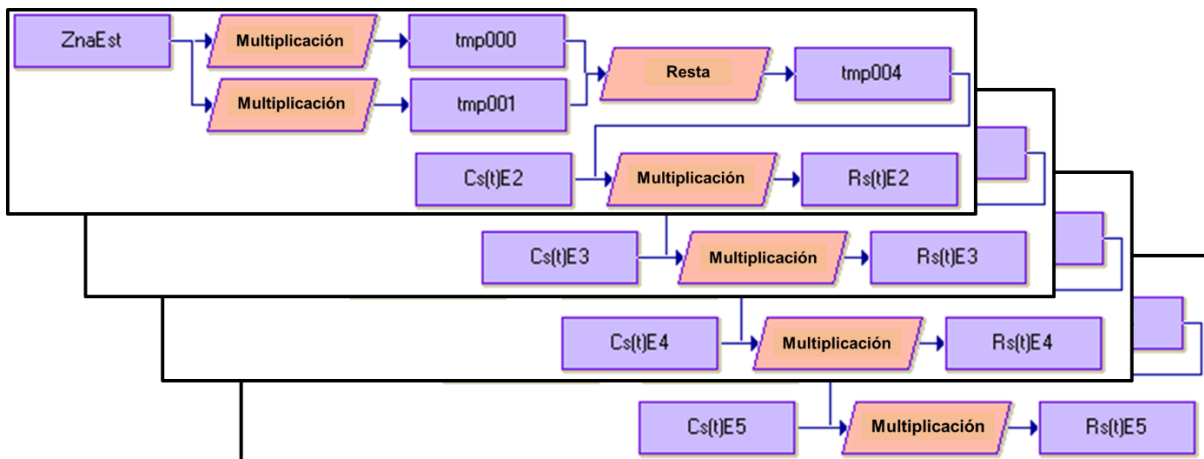
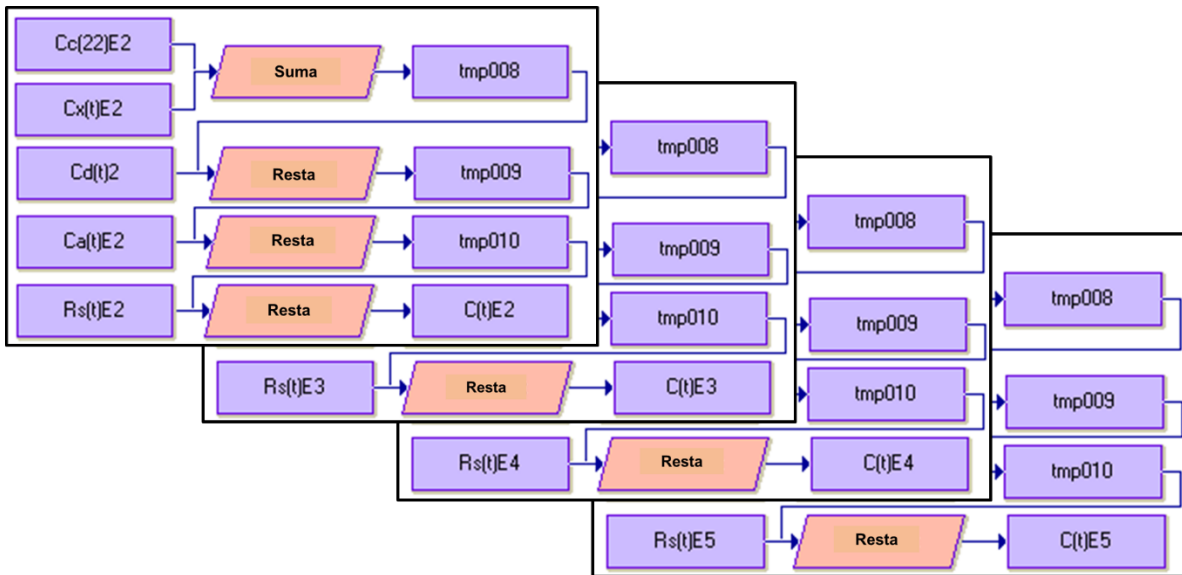


Figura 4.36. Plaguicida lixiviado a las siguientes capas del suelo.



**Figura 4.37.** Balance de plaguicida por capa de suelo.

# Capítulo 5

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos y su discusión del trabajo de investigación.

### 5.1 Estudios de campo

Como resultados del trabajo de campo debido a las múltiples salidas que se realizaron a la zona de estudio, a continuación se describen de forma explícita cada una de estas etapas:

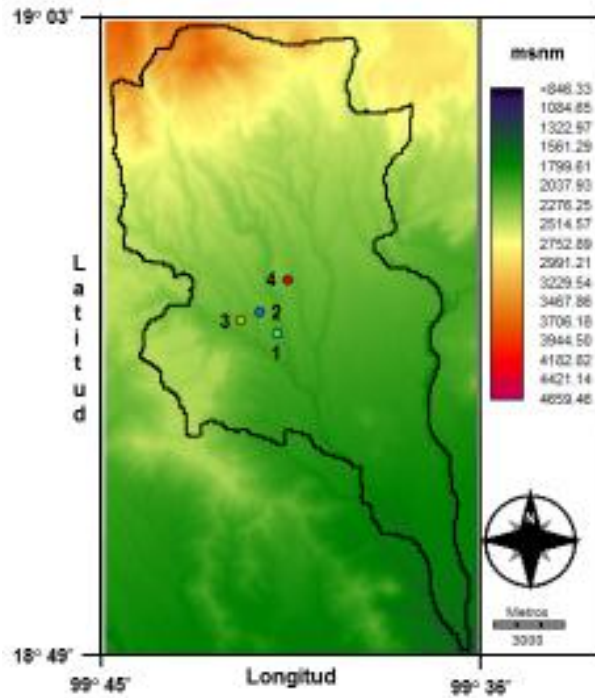
#### 5.1.1 Ubicación espacial de los invernaderos en la zona de estudio

Las coordenadas geográficas de los puntos de ubicación de los invernaderos visitados en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México, México, fueron tomados con un GPS, los cuales se muestran en la tabla 5.1, junto con las poblaciones pertenecientes a dicho municipio.

*Tabla 5.1. Localización geográfica de invernaderos.*

<b>Localidad (Villa Guerrero)</b>	<b>Invernadero</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>
Zacango	1	99 <sup>0</sup> 41' 6.6"	18 <sup>0</sup> 56' 29"
Zacango	2	99 <sup>0</sup> 41' 31.5"	18 <sup>0</sup> 56' 59.2"
Zacango	3	99 <sup>0</sup> 42' 0.3"	18 <sup>0</sup> 56' 48.8"
San Mateo Coapexco	4	99 <sup>0</sup> 40' 50.8"	18 <sup>0</sup> 57' 44.3"

La figura 5.1, muestra la ubicación y distribución espacial de los invernaderos dentro del límite municipal, los cuales, fueron importados a través del empleo del software de SIG TerrSet. Los invernaderos mostrados, son resultado de haber contactado a cuatro productores de flor Gerbera a nivel de invernadero en la zona. La ubicación poblacional de los invernaderos en el municipio de Villa Guerrero son las siguientes: el 1, 2 y 3, se ubican en el poblado de Zacango, mientras que, el 4, está en la localidad de San Mateo Coapexco.



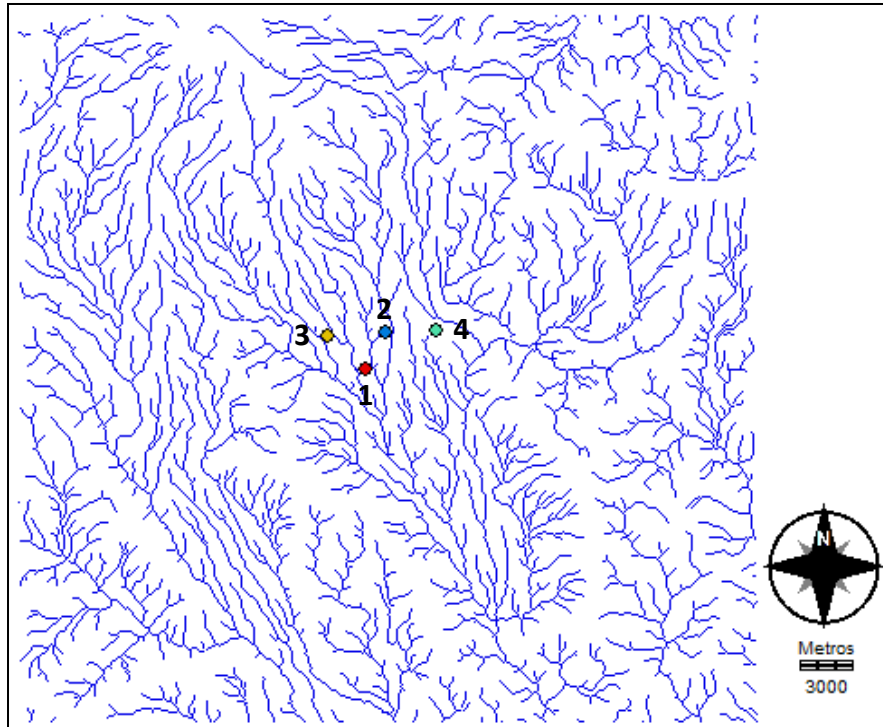
*Figura 5.1. Ubicación y distribución espacial de los invernaderos dentro del límite municipal.*

### 5.1.2 Zona de estudio

Ya ubicados los invernaderos en la zona de estudio y con el empleo del MNA, se generó la red hidrográfica de la zona. Una vez generada la red hidrográfica, se le sobrepuso la imagen vectorial de los invernaderos (Figura 5.2) para observar su ubicación espacial, con el propósito de establecer la identificación de los invernaderos dentro de la red de drenaje y así, establecer su cercanía a los cauces de agua de la zona.

Las imágenes de la figura 5.3, muestran los invernaderos visitados que se contemplaron para realizar el presente estudio. Debido a las observaciones realizadas durante las visitas a los invernaderos y del acercamiento directo con los productores, se pudo constatar que, en la mayoría de éstos, se tratan de microempresas familiares, ya que la familia está involucrada directamente en las actividades florícolas desde edades tempranas, todos los días de la semana, sin importar el género. Es común que, también, se empleen a trabajadores, hombres y mujeres, sin embargo, las más solicitadas para trabajar son las mujeres. El periodo de tiempo

de trabajo de las mujeres en un lugar, suelen ser muy cortos, quizá esto se deba a que, los salarios son muy bajos, con respecto al que perciben los hombres.



**Figura 5.2.** Imagen compuesta de la red de hidrográfica e invernaderos.

Por otro lado, durante las visitas a los invernaderos también se observó que, los envases de plaguicidas que se encuentran en los invernaderos no son almacenados en lugares adecuados y en algunos casos, los agricultores los queman, y otros los envían al basurero, pero en ningún momento, los floricultores siguen la normatividad en cuanto al almacenamiento, manejo, transporte y aplicación (NOM-232-SSA1-2009). Con lo que se puede percibir que, a pesar de que existe la legislación y normatividad respecto al uso y manejo de plaguicidas, según lo presentado en el apartado de marco teórico, los floricultores, abusan en el uso de los plaguicidas, debido a que estas normas son muy generales y no advierten de los daños que pueden causar.

Una vez que los productores realizan la fumigación dentro de los invernaderos, los envases son guardados en costales los cuales posteriormente se envían al basurero municipal en donde se mezclan con todo tipo de basura, algunos otros son olvidados afuera de los invernaderos. La

venta de los plaguicidas en la comunidad se realiza sin restricciones y en la mayoría de los casos son mezclados.

En la comunidad se ha incrementado el trabajo agrícola por lo fructífero que ha sido el cultivo de la flor en esta zona, tal situación provoca la exposición de la población a entornos tóxicos y a que el ambiente se convierta en zona de contaminantes para los sistemas biótico y abiótico.



**Figura 5.3.** Exposición de trabajadores y niños a plaguicidas

Durante las visitas a los invernaderos, se observó que éstos cuentan con diversas características estructurales, tal como se puede observar en las figura 5.4, algunos son sencillos y otros más tecnificados, estos últimos tienen equipos de medición de parámetros ambientales dentro del invernadero, como un medidor de temperatura de plástico (termómetro de máximos y mínimos).

Para la modelación, fue importante caracterizar el invernadero a estudiar, ya que estos datos permitieron tener un conocimiento previo, de la posible dispersión de los plaguicidas en el medio de estudio. En la elección del invernadero en el que se llevó acabo el estudio, algunos de los criterios que se contemplaron fueron los siguientes: la repetición de plaguicidas aplicados en los invernaderos, el CIA teórico y de campo, los bioensayos, solubilidad, persistencia y peligrosidad.



**Figura 5.4.** Invernaderos visitados con diferentes estructuras

### Caracterización de los plaguicidas empleados en los invernaderos

Las tablas 5.2, 5.3 y 5.4, muestran los plaguicidas empleados según el agricultor de cada invernadero entrevistado, junto con la clasificación de los ingredientes activos que contienen, el grupo químico al que pertenecen y la clasificación toxicológica (C.T) según la OMS. I: extremadamente tóxico, II: altamente tóxico, III: moderadamente tóxico y IV: ligeramente tóxico. La información al respecto del invernadero 3 no aparece debido a la negativa del productor para proporcionar la información correspondiente.

**Tabla 5.2.** Plaguicidas empleados en el invernadero 1.

Nombre comercial	Ingrediente activo	Grupo químico	Clasificación Toxicológica
Agrimec	Abamectina	pentaciclina	I
Lannate	Metomilo	carbamato	II
Benolate	Benomilo	benzimidazol	IV
Rovral	Iprodiona	imida	IV
Trigard	Ciromazina	triazina	IV
Mitac	Amitraz	Triazapenta dieno	IV

**Tabla 5.3. Plaguicidas empleados en el invernadero 2.**

Nombre comercial	Ingrediente activo	Grupo químico	Clasificación Toxicológica
Evisect S	Thiocyclam	oxalato	III
Trigard	Ciromazina	Triazina	IV
Agrimec	Abamectina	pentaciclina	I
Thiodan	Endosulfán	Organoclorado	II
Ortene	Acephate	Organofosforado	II
Spintor	Spinosad		III
Nuvacron	Monocrotofos	organofosforado	I
Cascade	Flufenoxuron	benzoylurea	IV
Prostar	flutolanil	benzanilida	IV
Rovral	Iprodiona	imida	IV
Promet	furathiocarb	carbamato	III
Captan	Captan	carboxamida	IV

**Tabla 5.4. Plaguicidas empleados en el invernadero 4.**

Nombre comercial	Ingrediente activo	Grupo químico	Clasificación Toxicológica
Agromil	Clorpirifos	organofosforado	IV
Talstar	bifentrina	piretroide	III
Agriver	Abamectina	pentaciclina	I
Thiodan	Endosulfán	organoclorado	II
Vydate	Oxamil	carbámico	I
Monitor	Metamidofos	organofosforado	I
Kumulus	Azufre	inorgánico	IV
Folpan	Folpet	ftaleimida	IV
Disparo	Clorpirifosetil/ Permetrina	organofosforado/ piretroide	III
Evisect	Thiocyclam	oxalato	III
Rovral	Iprodione	imida	IV
Tecto	Tiabendazol	benzimidazol	III
Cercobin	Metil tiofanato	tiocarbamato	IV
Herald	Fenpropatrin	piretroide	I
Switch	Fludioxinil+cinoprodil	ditiocarbámico	IV
Lannate	Metomilo	carbamato	II

## **Características y descripción del invernadero de estudio ubicado en San Mateo Coapexco:**

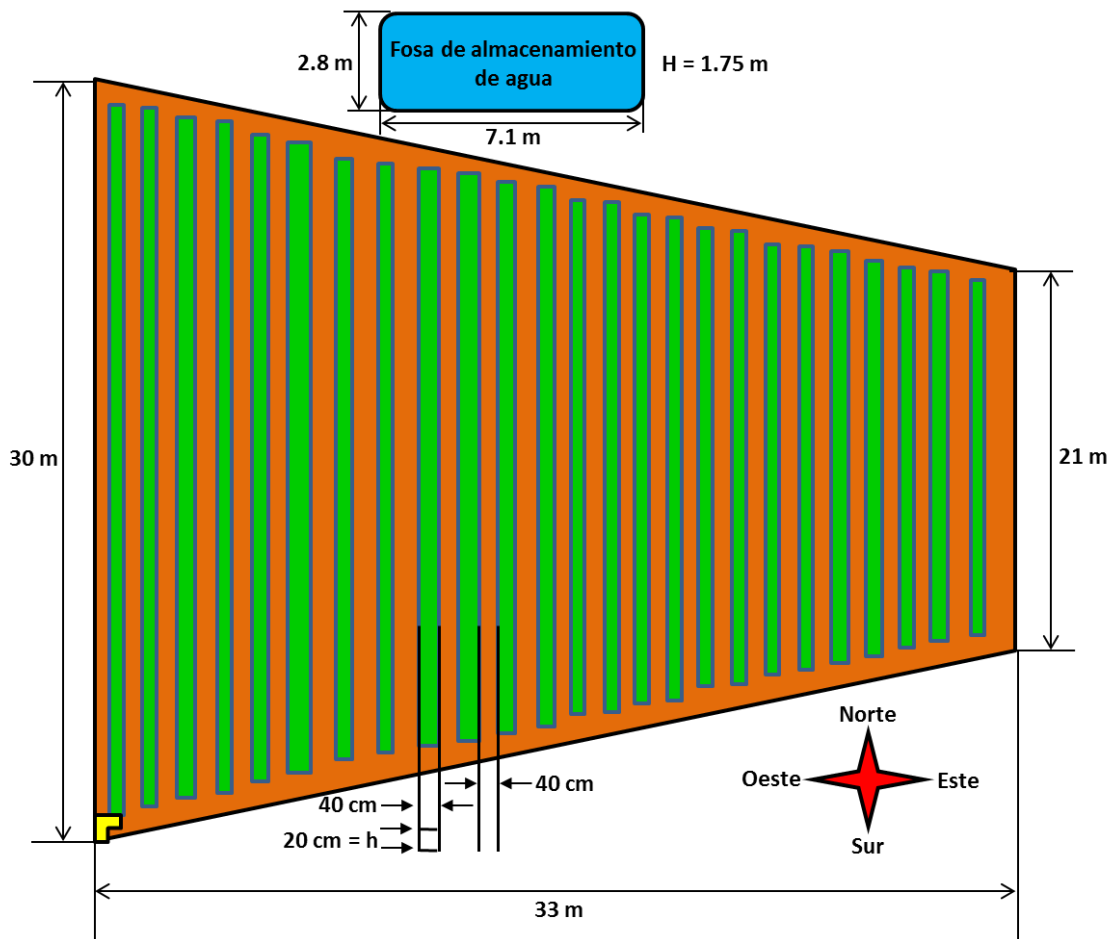
El invernadero 4 ubicado en la comunidad de San Mateo Coapexco fue construido en 2002, el área de cultivo de flor gerbera durante el estudio fue de 841.5 m<sup>2</sup> (Figuras 5.5 y 5.6). El control de la temperatura interna se realiza abriendo una cortina de nailon lateral para permitir la entrada de aire y que este circule dentro del invernadero, para ventilarse y así reducir la temperatura. Tiene una forma geométrica de trapecio con una sola puerta, con:

- Estructura de metal con postes de tubo de hierro galvanizado lo que permite proteger el cultivo de gerbera del viento, lluvias, heladas de entre otros factores.
- Sistema de riego por goteo, que se realiza generalmente 1 o 2 veces por semana, los días lunes y jueves, dependiendo del requerimiento de la flor.
- En temporadas altas de venta de flores se aplican riegos de punta profundos, según el agricultor para excita el cultivo y así obtener una mayor producción.
- El agua para riego proviene de manantiales que se encuentran dentro de la comunidad, la cual es transportada por medio de canales.
- Tiene un depósito de agua que se encuentra dentro del invernadero.
- La aplicación de agroquímicos y plaguicidas en el invernadero es por aspersión por medio de una parihuela.
- La cubierta del invernadero es de plástico.
- No cuenta con equipo para controlar la temperatura dentro del invernadero, ni con sistema de calefacción interna
- Tiene una antigüedad de 16 años aproximadamente.
- El periodo de duración de la planta del cultivo es de 4 años.
- Para el agricultor la actividad florícola constituye su principal fuente de ingresos, esto es a través de la venta directa al consumidor.
- La aireación se regula de forma manual, para el control de enfermedades de la planta se realizan a través prácticas preventivas y de mantenimiento de la limpieza del invernadero.
- Alrededor del invernadero existen otros tipos de cultivos de flor en invernadero así como a cielo abierto.



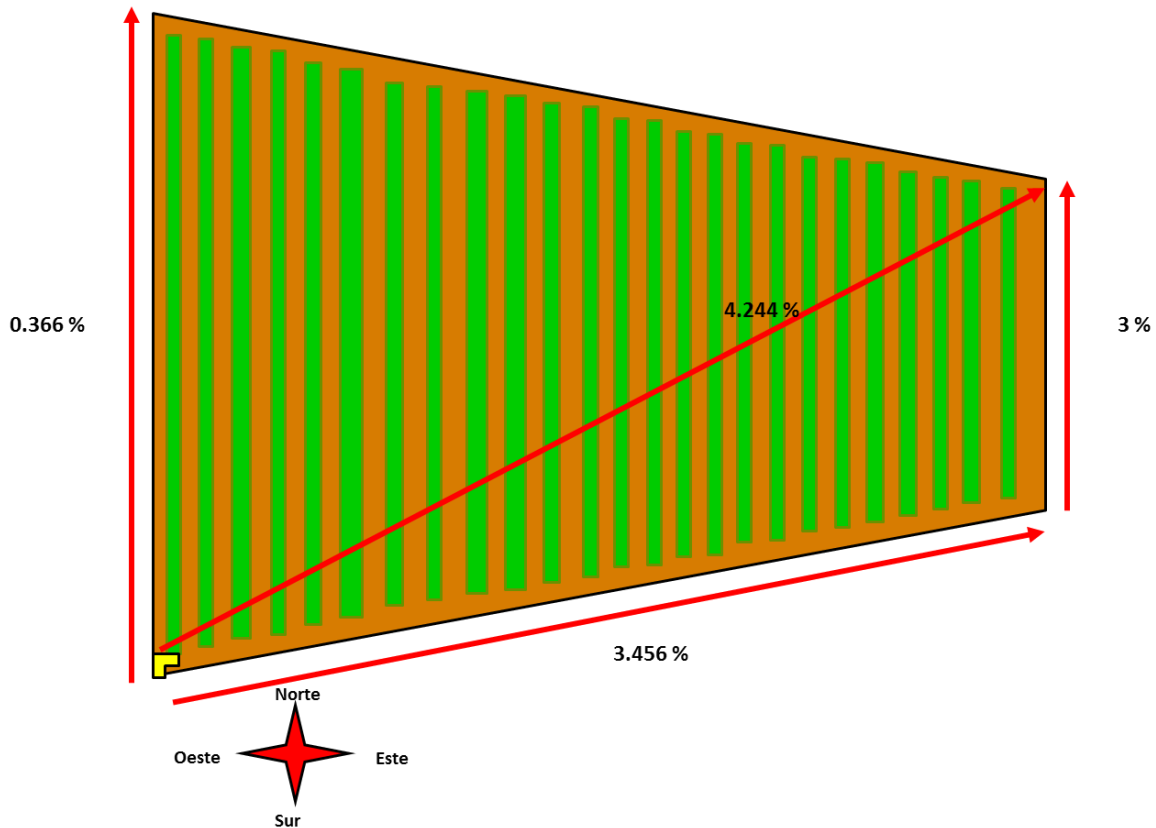
- Los envases vacíos de plaguicidas son enviados a un centro de acopio o al basurero del municipio.
- El invernadero se encuentra a unos 300 metros de un río.
- La temporada de mayor producción de la flor son durante los meses de marzo, abril, mayo, septiembre, noviembre y diciembre.

## Descripción



**Figura 5.5.** Dimensiones del área de estudio.





**Figura 5.6.** Magnitud y sentido de pendientes del área de estudio.

En la figura 5.7, se muestra una imagen compuesta 247 (BGR) en falso color de la cobertura de suelo que prevalece en el área donde se ubica el invernadero 4, para ello, se emplearon imágenes del satélite spot que fueron tomadas el 28 de febrero del 2014.

En la imagen compuesta se puede observar, que dentro de la zona, existe una proliferación indiscriminada de invernaderos para el cultivo de flores (color rosa y blanco). La proliferación de estos en la zona, se hace mucho más evidente, cuando se llega a transitar por las principales carretas de la comunidad



**Figura 5.7.** Imagen en color compuesto de la zona donde se ubica el invernadero 4.

### 5.1.3 Análisis de plaguicidas aplicados

Con la información obtenida de los plaguicidas aplicados en los invernaderos para el cultivo de la flor Gerbera mostrados en las tablas anteriores, es como se desprenden los datos de la tabla 5.5, que representan los plaguicidas por ingrediente activo repetitivos aplicados en los tres invernaderos analizados.

**Tabla 5.5.** Plaguicidas frecuentemente utilizados en los invernaderos.

Invernadero 1	Invernadero 2	Invernadero 4
Abamectina	Abamectina	Abamectina
Metomilo		Metomilo
Ciromazina	Ciromazina	
	Endosulfán	Endosulfán
Iprodiona	Iprodiona	Iprodiona

Como se ha señalado en la metodología, otro factor importante que se consideró para determinar a los plaguicidas por analizar, fue la determinación del Coeficiente de Impacto Ambiental (CIA) de los plaguicidas mostrados en la tabla 5.5, empleando la metodología de Kovach *et al.* (1992), el cual contempla tres componentes como: el trabajador, el consumidor y la biota no humana, además, de considerar los valores de CIA de campo obtenidos por Tecuapetla (2014).

Los resultados obtenidos de los cálculos del CIA de los plaguicidas que se aplican comúnmente en los invernaderos y que se analizaron de la zona de estudio, se interpretan de la siguiente manera: Según el valor del CIA del plaguicida, indica el grado que es perjudicial al ambiente, con base en los tres sistemas de producción agrícola contemplados en el cálculo, en este caso y con base en lo que se muestra en la tabla 5.6, el endosulfán es el más perjudicial y el menos perjudicial, es la ciromazina. Sin embargo, respecto al CIA de campo calculados el que resulta causar mayor impacto es el metomilo y después el endosulfán.

**Tabla 5.6.** Valores del CIA de plaguicidas. (Insecticidas)

Ingrediente activo	CIA	CIA campo (Tecuapetla, 2014)
Abamectina	34.68	0.10 (1) 1.05 (2) 0.45 (4)
Metomilo	22.00	103.24 (1)
Ciromazina	18.29	12.16 (1) 16.46 (2)
Endosulfán	38.55	61.06 (2) 59.7 (4)

*Fuente: Kovach et al., 1992; Tecuapetla, 2014.*

(1) Invernadero, (2) Invernadero, (4) Invernadero

#### 5.1.4 Elección de plaguicidas a estudiar

Una vez obtenidos los datos de CIA de cada uno de los plaguicidas, considerando los que más se emplean en los invernaderos (frecuencia de repetición) y además de sus propiedades fisicoquímicas se determinó que, los plaguicidas a analizar en la modelación serían los que se muestran en el esquema de la figura 5.8. En tanto que, en la tabla 5.7 se muestra, la clasificación respecto al: nombre comercial al que pertenecen, cuál es su ingrediente activo, tipo de grupo químico al que pertenecen y a la clase de plaguicida que representan (Insecticidas).

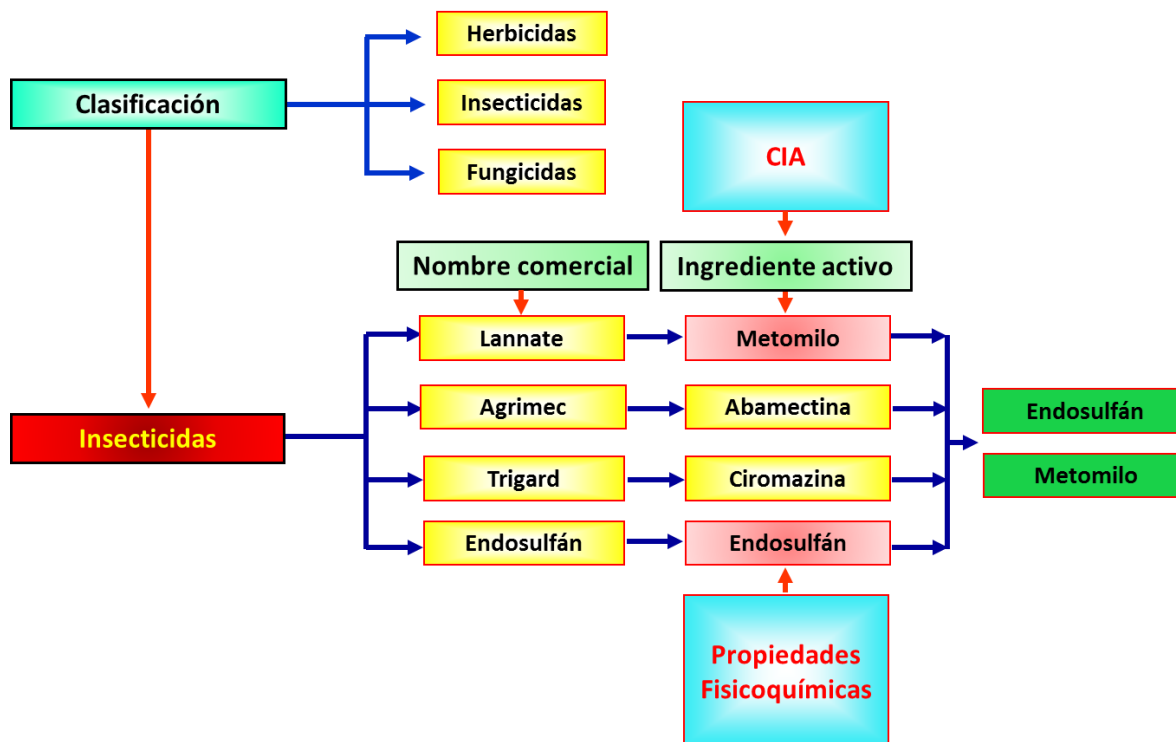


Figura 5.8. Plaguicidas a modelar.

Tabla 5.7. Características de plaguicidas repetitivos

Nombre comercial	Ingrediente activo	Grupo químico	Clase de plaguicida	Clase Toxicológica
Agrimec	Abamectina	Lactona	Insecticida	I (E. T.)
Lanate	Metomilo	Carbamatos	Insecticida	II (A.T.)
Trigard	Ciromazina	Triazina	Insecticida	IV (L.T.)
Thiodan	Endosulfán	Organoclorado	Insecticida	II (A.T.)

Fuente: Elaboración propia

### 5.1.5 Propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas contemplados para el análisis

La tabla 5.9, muestra en forma resumida las principales propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas mencionados anteriormente en la tabla 5.7, además, de los resultados de cálculo del coeficiente de impacto ambiental de campo. El análisis de sus propiedades fisicoquímicas de éstos, permiten conocer su comportamiento y su movilidad. Cabe indicar que, los parámetros

tomados en cuenta, son cuantificables, como la solubilidad, el Coeficiente de Partición Octanol-Agua ( $K_{ow}$ ), la presión de vapor, el Coeficiente de Carbono orgánico ( $K_{oc}$ ) y la Constante de la Ley de Henry. Parámetros que permiten saber, dónde se puede encontrar los plaguicidas y su posible degradación, ya que estos, se ven afectados por la cantidad de materia orgánica, el pH, la temperatura y por los microorganismos presentes en el suelo, entre otros. El tiempo de vida media, es otro de los parámetros considerados ya que, si éstos persisten más tiempo en el medio, es probable que puedan reaccionar con otros compuestos o adherirse al suelo y a la biota. Para obtener esta información fue necesario acceder a las siguientes páginas de bases de datos:

- La Red de Acción en Plaguicidas (PAN) (Pesticide Database) <http://www.pesticideinfo.org/>
- Toxnet (Toxicology data network) bases de datos sobre sustancias químicas, incluidos el Banco de Datos sobre Sustancias Peligrosas y la Toxline <http://toxnet.nlm.nih.gov/>
- La Agencia Europea de los Productos Químicos European Chemicals Agency (ECHA) <http://echa.europa.eu/>
- Centro Nacional de Información de Pesticidas (NPIC) <http://npic.orst.edu/index.es.html>
- Agencia para sustancias Tóxicas y el Registro de enfermedades (ATSDR) <http://www.atsdr.cdc.gov/>
- Syngenta <http://www3.syngenta.com/country/mx/es/Paginas/home.aspx>

Una vez analizado lo anteriormente descrito respecto a los plaguicidas contemplados para modelar, se observó que, el metomilo, es el plaguicida que presenta una mayor solubilidad en el agua (54,700 mg/l) y eso, lo posibilita de que sea más fácil de lixiviarse e incorporarse al agua subterránea, además, de que tiene un tiempo de vida media de 30 días, y un valor de CIA de 22, mientras que, el CIA de campo reportado por Tecuapetla (2014) fue de 103.4.

Por otro lado, el endosulfán, presenta una menor solubilidad (0.53 mg/l) respecto al metomilo, su CIA presenta un valor alto de 38.55 con respecto a los otros plaguicidas contemplados y un CIA de campo de 59.7 (Tecuapetla, 2014), además, tiene un tiempo de vida media de 50 días. Sin embargo, éste representa ser un plaguicida del grupo químico de los organoclorados, que ha sido prohibido desde hace algunos años en los países desarrollados y para el caso de México, restringido.

Con base en lo anteriormente señalado, se llegó a determinar que sería muy interesante modelar estos dos plaguicidas debido a sus características de uno respecto al otro en el presente trabajo de investigación. Sin embargo, debido a sus características y propiedades fisicoquímicas se decidió modelar al endosulfán.

En la tabla 5.8 se presentan los valores de las variables procedentes de la bibliografía empleados en la modelación.

**Tabla 5.8.** Valores de las variables requeridas en el modelado endosulfán obtenidas de la bibliografía.

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
<b>P<sub>P</sub></b>	Presión de vapor del plaguicida (mm de Hg).	1.0x10 <sup>-5</sup> (25 °C)
<b>P<sub>W</sub></b>	Presión de vapor del agua a la temperatura de invernadero (mm de Hg).	35.66 (32 °C)
<b>M<sub>P</sub></b>	Peso molecular del plaguicida (g/mol).	406.93
<b>M<sub>W</sub></b>	Peso molecular del agua (g/mol).	18.00
<b>Sw</b>	Solubilidad del plaguicida en el agua (mg/L).	0.53 (25 °C)
<b>[P]</b>	Volumen molar del plaguicida	649.40
<b>λ</b>	Constante de velocidad de degradación de primer orden (determinada experimentalmente a la temperatura T <sub>m</sub> y a un pH) (día <sup>-1</sup> ).	0.01228
<b>E<sub>a</sub></b>	Energía de activación de descomposición del plaguicida (cal/mol)	5040.611
<b>R</b>	Constante Universal de los gases (cal/°K mol)	1.9872
<b>T</b>	Temperatura a la que λ fue determinado (°K)	298
<b>t<sub>(1/2)</sub></b>	Tiempo de vida media (días)	56
<b>pH</b>	pH al que fue determinado λ	6.7
<b>B</b>	Constante de velocidad por cada unidad que se incrementa el pH (adimensional).	2.5

**Tabla 5.9.** Propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas.

<b>Criterios/Nombre comercial</b>	<b>Thiodan</b>	<b>Agrimec</b>	<b>Trigard</b>	<b>Lannate</b>	<b>Switch</b>		<b>Agromil</b>
Ingrediente activo	Endosulfán	Abamectina	Ciromazina	Metomilo	Ciprodinil (25 %)	Fludioxonil (37.5 %)	Clorpirifos
Tipo (familia)	organoclorado	lactona	triazina	Carbamatos	ditiocarbámico		organofosforado
Solubilidad en el agua	0.53 mg/L (*); 0.32 mg/L (1)	0.01 mg/L (2) prácticamente insoluble en agua 5 mg/L	13000 mg/l (*) y pH 7.9 (FAO) 13600 mg/l (4y)	54700 mg/l (*) (1) 58000 mg/l (4)	12 mg/l (**) (7) 16 (8)	1.8 mg/l (*) (7) 2mg/l (9)	0.4 mg/l (4) 1.18 mg/l (6)
Log Kow	3.83 (alfa), 3.62(beta)	4.4 a pH 7.2 (**) (3)	-0.69+-0.009 a Ph 7 (*) (FAO)	0.093 (*) (FAO)	4.0 a pH 7.0 (FAO)	4.12 +- 0.0016 (FAO)	4.007 (**) (FAO)
Koc	50	5000 (4)	756 (1) 200 (4)	43 (1) 72 (4)	1470 (8)	1610 (9)	6070 (4) 9930(6)
Constante de la Ley de Henry	6.5x 10 <sup>-5</sup> atm m <sup>3</sup> /mol (EPPA 1982 C) (**)	1.7x10 <sup>-7</sup> atm m <sup>3</sup> /mol (2)	5.8 x 10 <sup>-9</sup> Pa · m <sup>3</sup> /mol (FAO)	6.48 X 10 <sup>-5</sup> Pa atm <sup>3</sup> /mol (*) calculado por Motgonery.	6.60 X 10 <sup>-03</sup> (Pa m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	5.40 X 10 <sup>-05</sup> (Pa m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> )	6.6x10 <sup>-6</sup> atm- m <sup>3</sup> /mol at (*)
Vida media en el suelo	50 días (4)	28 días (4)	150 días (4)	30 días (4)	0.1- 2 (7) días	14 días no persiste en suelo (7)	30 días (4)
Vida media en hidrólisis (días promedio) (días)			28 (1)	30 (1)	32 (8)	30 (9)	2118 (6)
Vida media en suelo aeróbico (días)	27 (1)		63 (1)	46 (1)	126 (8)	102 (9)	30.5 (6)
t1/2 vida media en suelo anaeróbico (días)			97 (1)	1 (1)	183 (8)	365 (9)	
Cargas	4.69 L	0.72 L			15.64 L		5.21 L
Tipo de aplicación	aspersión	aspersión	aspersión	Aspersión	aspersión	aspersión	aspersión
Toxicidad	II (altamente tóxicos).	I (extremadame nte tóxicos)	IV (ligeramente tóxicos)	II (altamente tóxicos).	IV (ligeramente tóxicos)		III (moderadamente tóxicos)
Presión de vapor	1x10 <sup>-5</sup> mmHg (*)	1.5 X 10 <sup>-9</sup> mmHg (*) (2)	4.48 X 10 <sup>-7</sup> Pa (*) (FAO) =3.36 x 10 <sup>-9</sup> mmHg	0.72 mPa (*) (FAO) =5.4 X 10 <sup>-6</sup> mmHg	3.8 x 10 <sup>-6</sup> mmHg (*)	2.9 x 10 <sup>-9</sup> mmHg (*)	1.9 x 10 <sup>-5</sup> mm Hg (*) (5)
Peso molecular	406.93	873.1	166.18 (1)	162.2 (1)	225.29 (8)	248.2 (9)	350.62 (6)
CIA en campo	59.7	0.45			233.36		62.27
CIA de tablas	38.55	34.68	18.29	22	26.77	23.87	26.85

(1) [www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC33510](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC33510)

(2) <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+6941>

(3) [http://echa.europa.eu/documents/10162/13579/rac\\_bd\\_abamectin\\_en.pdf](http://echa.europa.eu/documents/10162/13579/rac_bd_abamectin_en.pdf)

(4) <http://npic.orst.edu/ingred/ppdmmove.htm>

(5) <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp84.pdf>

(6) [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC33392](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC33392)

(7) [http://www.syngenta.com.mx/Data/Sites/1/descargables/hds/hds\\_switch\\_625\\_wg.pdf](http://www.syngenta.com.mx/Data/Sites/1/descargables/hds/hds_switch_625_wg.pdf)

(8) [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC35774](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC35774)

(9) [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC35910](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC35910)

Solubilidad: \* = a 25 °C \*\* = 20 °C 1 sin Temp.

Carga: aplicados por año en 1000 m<sup>2</sup>

## 5.2 Parámetros de suelo obtenidos del invernadero

Con base a los requerimientos de las variables de las ecuaciones de balance de plaguicidas descritas en el capítulo anterior, se obtuvieron los parámetros de campo de la zona de estudio (Figura 4.12) los cuales se muestran a continuación, empezando por granulometría del suelo.

### 5.2.1 Análisis granulométrico del suelo

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico de suelo del invernadero de estudio se muestran en la tabla 5.10 y 5.11. De acuerdo a la M-MMP-1-02/03, como el 98.31 % del material pasa la malla No. 4, se trata de un suelo arenoso. Mientras que, la curva granulométrica para calcular los coeficientes de curvatura y uniformidad de las partículas de suelo se muestra en la figura 5.9, en donde, las líneas de colores en la figura indican los valores del tamaño de partícula para el cálculo de los coeficientes.

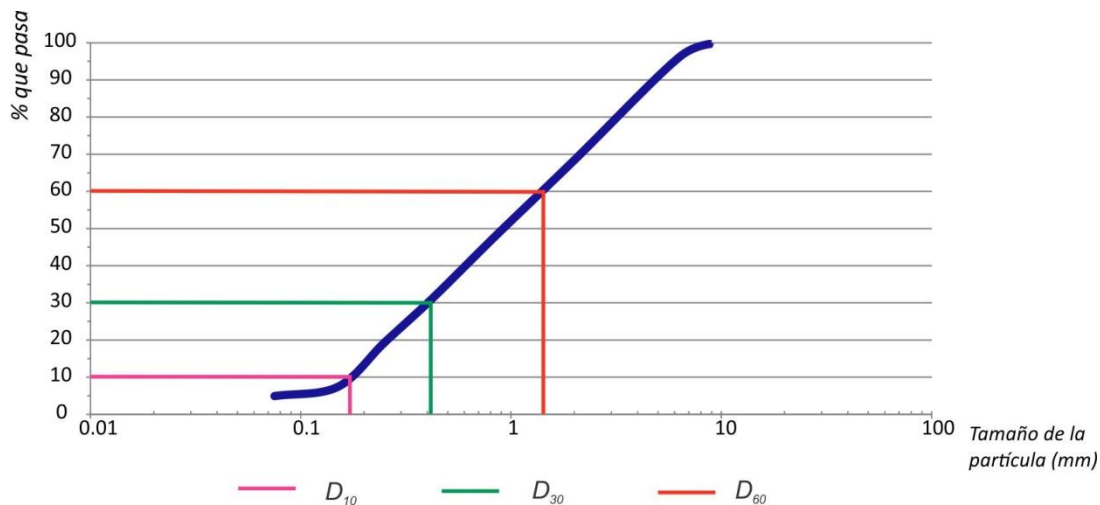
**Tabla 5.10.** Composición granulométrica del suelo.

<i>COMPOSICION GRANULOMETRICA DEL MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA No. 4</i>					
<i>Malla</i>		<i>Peso retenido parcial</i> gr	<i>Retenido parcial</i> %	<i>Retenido acumulado</i> %	<i>% que pasa la malla</i>
<i>mm</i>	<i>pulgadas</i>				
50	2	0	0.00	0.00	100
37.5	1 1/2"	0	0.00	0.00	100.00
25	1"	0	0.00	0.00	100.00
19	3/4 "	0	0.00	0.00	100.00
1.27	1/2 "	0	0.00	0.00	100.00
9.5	3/8 "	0	0.00	0.00	100.00
6.3	No. 4	8.45	1.69	1.69	98.31
	PASA No. 4	500	98.31	100.00	
	MUESTRA	500	100.00		
<i>COMPOSICION GRANULOMETRICA DEL MATERIAL TAMIZADO POR LA MALLA No. 4</i>					
<i>Malla</i>		<i>Peso retenido parcial</i> gr	<i>Retenido parcial</i> %	<i>Retenido acumulado</i> %	<i>% que pasa la malla</i>
<i>mm</i>	<i>No.</i>				
2	10	76.1	15.22	15.22	83.09
0.85	20	98.65	19.73	34.95	63.36
0.425	40	84	16.80	51.75	46.56
0.25	60	57.45	11.49	63.24	35.07
0.15	100	77.1	15.42	78.66	19.65
0.075	200	32.8	6.56	85.22	13.09
	PASA No. 200	65.45	13.09	98.31	0.00
	total	491.55	98.31		



**Tabla 5.11.** Determinación de la clase textural granulométrica.

suelo	Proporción (%)	
	Arena y gravas	Finos
	86.91	13.09



**Figura 5.9.** Curva granulométrica para calcular el coeficiente curvatura y uniformidad.

Según los cálculos obtenidos del coeficiente de uniformidad y curvatura del suelo que a continuación se muestran, ratifican que en efecto se trata de un suelo arenoso.

Coeficiente de uniformidad (Cu):

$$Cu = D_{60}/D_{10} = 1.5/0.18 = 8.33$$

Coeficiente de curvatura (Cc):

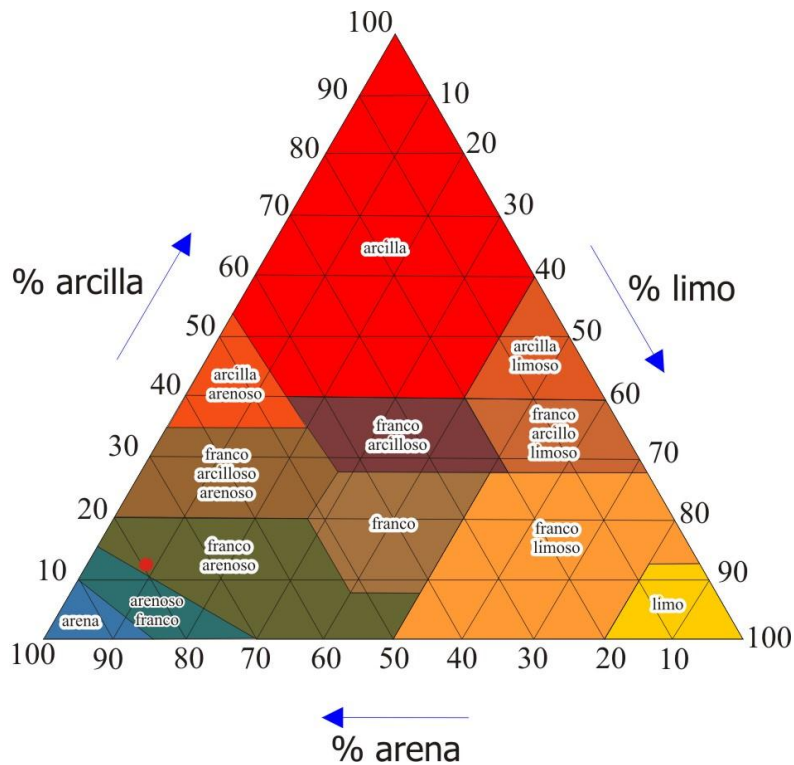
$$Cc = (D_{30})^2/D_{10} * D_{60} = (0.41)^2/(0.18 * 1.5) = 0.62$$

Debido a que, el porcentaje total de suelo fino obtenido fue de 13.09, su separación cuantitativa en porcentajes de arena, arcilla y limo aplicando el método de Bouyoucos (Tabla 5.12), resulto corresponder ser un suelo franco arenoso según el triángulo textural (Figura 5.10).

**Tabla 5.12.** Determinación de clase textural Bouyoucos.

Suelo	Proporción (%)		
	Arena	Limo	Arcilla
	78.31	13.17	8.52

Arena=2.00 a 0.05 mm; limo= 0.05 a 0.002 mm; arcilla=menores de 0.002 mm de diámetro



**Figura 5.10.** Triángulo textural para la denominación de un suelo según su textura.

La textura de suelo es un componente importante en relación con la lixiviación, cuanto más fina es la textura mayor capacidad de retención presenta, conocer este parámetro permite saber cómo influye en el transporte y la infiltración de plaguicidas. Debido a que contiene una gran cantidad de arenas finas, para este tipo de suelo la conductividad hidráulica saturada es  $K_s=3.0$  (m/d) (Gabriels *et al.*, 2006).

## 5.2.2 Materia orgánica (MO) del suelo

La importancia del análisis en los suelos de la MO se debe a que, indica la fertilidad de un suelo y, para su interpretación y clasificación de los resultados obtenidos de las muestras de suelo, se ha utilizado el método Walkley y Black, según el cual está clasificado de acuerdo a la tabla obtenida de la NOM-021-SEMARNAT.

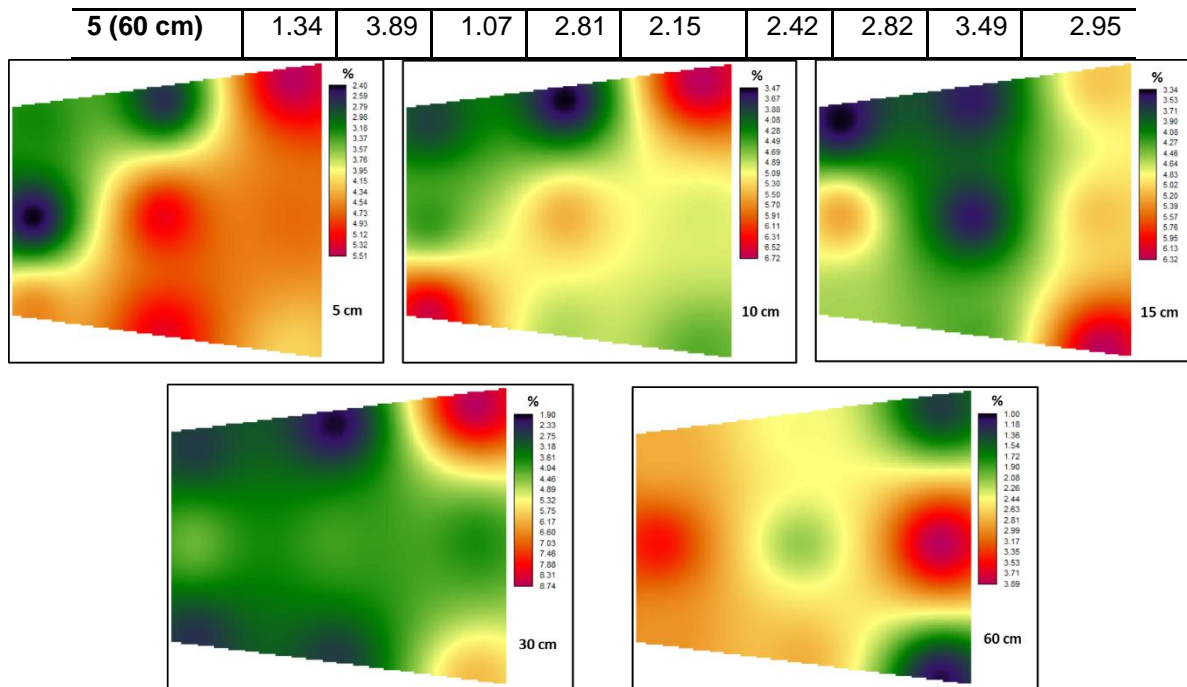
Con base en los resultados obtenidos de este análisis se muestran en la tabla 5.13, se observó que el porcentaje del carbón orgánico (CO) se encuentra entre un rango de 0.624 a 5.07 y un promedio de 2.36 de las 45 muestras tomadas. Mientras que, la MO va de un rango de 1.07 a 8.74 % y presenta un promedio 4.10 % (Tabla 5.14). En general y en la mayoría de los casos, los porcentajes de MO se observa son mayores a nivel de superficie del suelo y a mayor profundidad la MO disminuye, a lo que podría interpretarse que, el plaguicida posiblemente se fije más en las primeras capas del suelo debido a los procesos de adsorción que produce la MO. Los datos de la MO de cada capa interpolados de la tabla 5.14 se muestran en las imágenes de la figura 5.11. El método de interpolación empleado fue el de Interpool que se encuentra ya implementado en el software de SIG TerrSet con una resolución de 20 cm por píxel.

**Tabla 5.13.** Resultados de carbón orgánico contenida en las muestras de suelo (%).

<b>Carbono orgánico</b>									
<b>Capa</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1 (5 cm)</b>	3.19	2.72	2.41	3.04	3.01	1.56	1.87	1.40	2.65
<b>2 (10 cm)</b>	3.9	2.88	2.64	2.80	3.19	2.02	2.26	2.57	3.82
<b>3 (15 cm)</b>	2.96	2.96	3.66	2.49	2.02	2.02	1.95	3.04	2.65
<b>4 (30 cm)</b>	5.07	2.18	3.51	1.55	2.34	1.17	1.56	2.49	1.48
<b>5 (60 cm)</b>	0.78	2.26	0.624	1.63	1.24	1.40	1.63	2.02	1.71

**Tabla 5.14.** Resultados de materia orgánica contenida en las muestras suelo (%).

<b>Materia orgánica</b>									
<b>capa</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1 (5 cm)</b>	5.51	4.70	4.16	5.24	5.20	2.68	3.22	2.42	4.57
<b>2 (10 cm)</b>	6.72	4.97	4.55	4.84	5.50	3.49	3.89	4.43	6.58
<b>3 (15 cm)</b>	5.10	5.10	6.32	4.30	3.48	3.49	3.36	5.24	4.57
<b>4 (30 cm)</b>	8.74	3.76	6.05	2.68	4.03	2.01	2.68	4.30	2.55



**Figura 5.11.** Imágenes superficiales de materia orgánica.

### 5.2.3 pH del suelo

El pH es una propiedad química del suelo, su valor indica la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en la interfase líquida del suelo y tiene relación con la nutrición del suelo. Cuando, el suelo presenta una alta concentración de iones hidrógeno, se considera ácido y cuando presenta una baja concentración se considera básico. Para el cálculo se utilizó el método de pH para suelos ácidos (KCl 1M), en la interpretación y clasificación, con la metodología de Serrato y Landeros (2001), la cual se muestra en la tabla 5.15.

**Tabla 5.15.** Clasificación de pH.

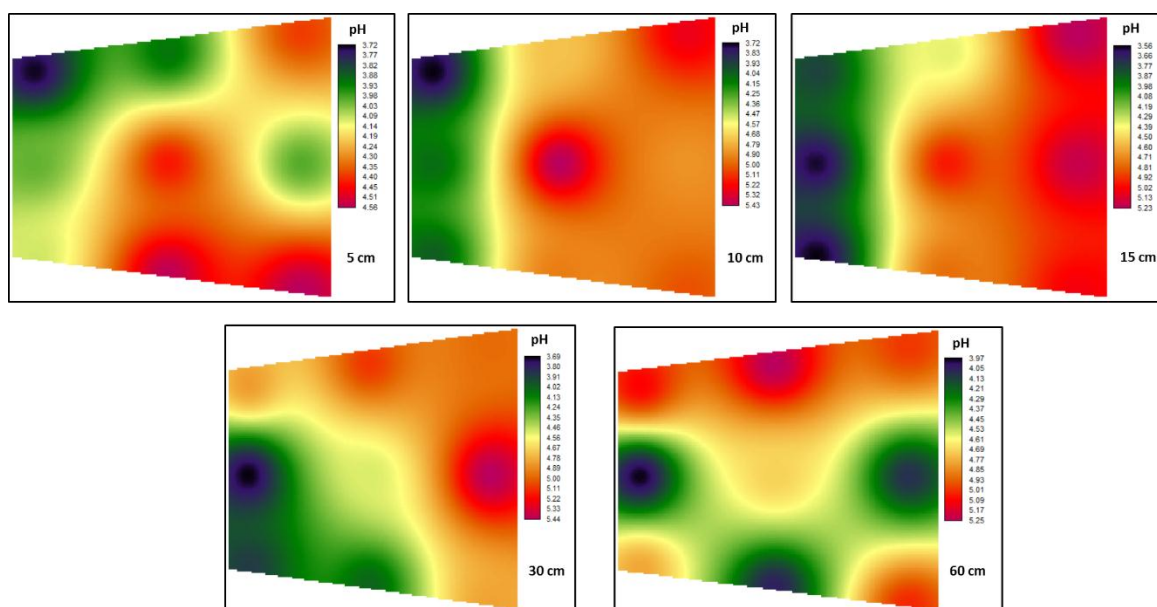
Clasificación	pH
<b>Fuertemente ácido</b>	< 5.0
<b>Moderadamente ácido</b>	5.1-6.5
<b>Neutro</b>	6.6-7.3
<b>Medianamente alcalino</b>	7.4-8.5
<b>Fuertemente alcalino</b>	> 8.5

*Fuente: Serrato y Landeros (2001)*

Los resultados obtenidos del análisis de pH de cada capa y de cada una de las muestras puntuales de suelo se muestran en la tabla 5.16. En promedio se estima un pH de 4.52, lo que representa según la tabla 5.15 un suelo fuertemente ácido. Resultados que tienden a ser lógicos debido a la gran variedad y cantidad de plaguicidas aplicados en el invernadero, que además corroboran la presencia del proceso de lixiviación. Estos valores bajos en el pH podrían ser equilibrados con el contenido de materia orgánica que tiene el suelo y los fertilizantes (abonos) que le aplica el agricultor. La interpolación de los datos de cada capa mostrados en la tabla 5.16 se observan en la figura 5.12.

**Tabla 5.16.** Resultados de pH obtenido del suelo en cada capa de análisis.

capa	pH								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1 (5 cm)</b>	4.39	4	4.56	4.55	4.43	3.91	3.73	4.01	4.1
<b>2 (10 cm)</b>	5.27	4.87	5.04	4.93	5.43	4.74	3.73	4.08	4.03
<b>3 (15 cm)</b>	5.23	5.19	5.05	4.78	4.97	4.35	3.78	3.59	3.57
<b>4 (30 cm)</b>	4.98	5.44	4.82	4.03	4.50	5.10	4.84	3.70	3.89
<b>5 (60 cm)</b>	5.00	4.09	5.03	4.05	4.7	5.25	5.09	3.98	4.79



**Figura 5.12.** Imágenes superficiales de cada capa de pH del suelo.

#### 5.2.4 Densidad aparente

Los datos de densidad aparente del suelo estimados se muestran en la tabla 5.17, en la cual se puede observar que, ésta va aumentando a medida que aumenta la profundidad, esto se debe a que, la mayor parte de la materia orgánica se encuentra situada en las primeras capas del suelo y la relación es, entre mayor densidad aparente menor materia orgánica y viceversa. Consecuentemente, menor agregación y mayor compactación. Para un suelo franco arenoso, como el caso de suelo en estudio, estos valores de densidad aparente no se consideran altos.

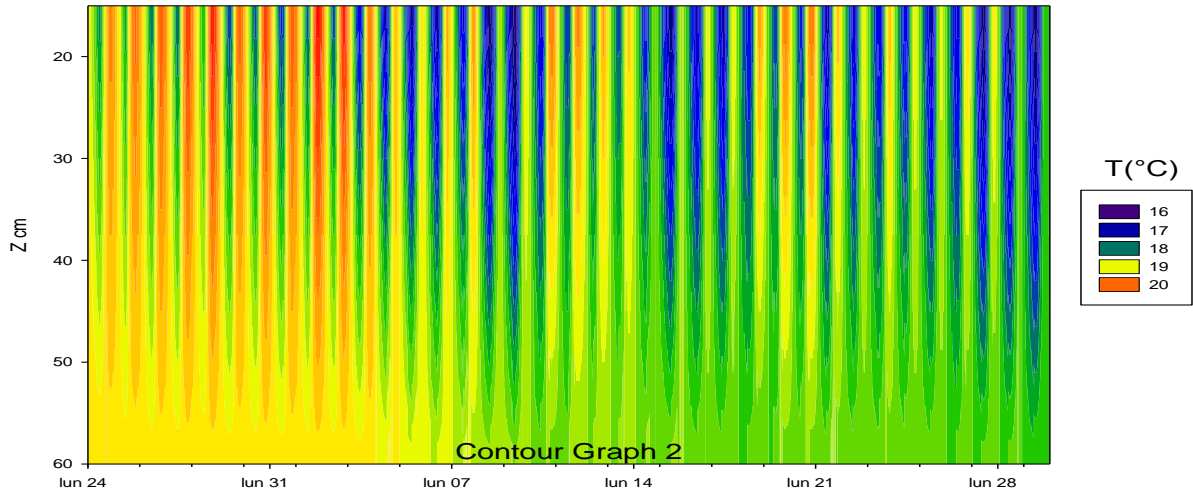
**Tabla 5.17.** Resultados de densidad aparente en la profundidad del perfil del suelo de estudio.

<b>Rango</b> (profundidad en cm)	<b>Densidad aparente</b> (gr/cm <sup>3</sup> )
0-5	0.765
5-10	0.765
10-15	1.026
15-30	1.0245
30-60	1.0

#### 5.2.5 Humedad y temperatura del suelo (sensores)

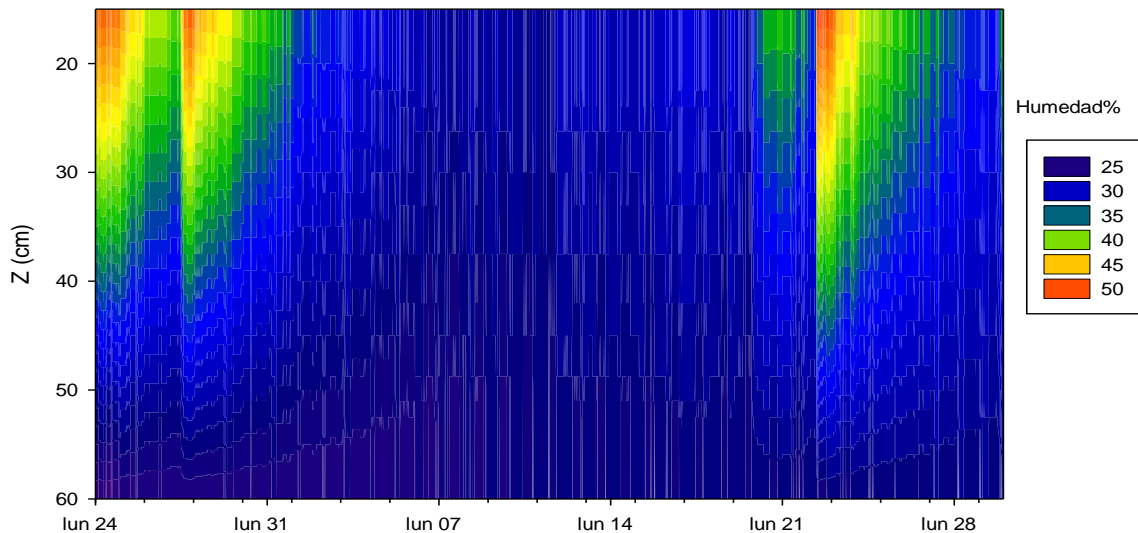
Los registros de temperatura y humedad del suelo del 24 de agosto al 30 de septiembre del 2015 por el sensor Watchdog se muestran en las siguientes figuras 5.13 y 5.14. En la imagen de temperatura se observa que en la última semana de agosto en las capas superficiales del suelo durante el día la temperatura es mayor (alrededor de 20 °C), mientras que, por las noches éstas no descienden demasiado (18 °C).

Sin embargo, en las siguientes semanas ya durante el mes de septiembre, se observan descensos de ésta durante el día como por las noches. Estos cambios son más notorios en las capas superficiales del suelo, mientras que, en las capas más profundas ahora prevalecen las temperaturas más altas.



**Figura 5.13.** Registro del comportamiento de la temperatura del suelo por sensores.

En la figura 5.14 se muestra el comportamiento de la humedad prevaeciente en el suelo durante el rango de tiempo especificado en la imagen, en el cual se observa que, los porcentajes más altos (50 %) se presentan en las capas más superficiales del suelo y sólo en ciertos periodos de tiempo, estos cambios muy notorios del comportamiento de la humedad se deben sin lugar a dudas a los periodos de riegos aplicados al cultivo.

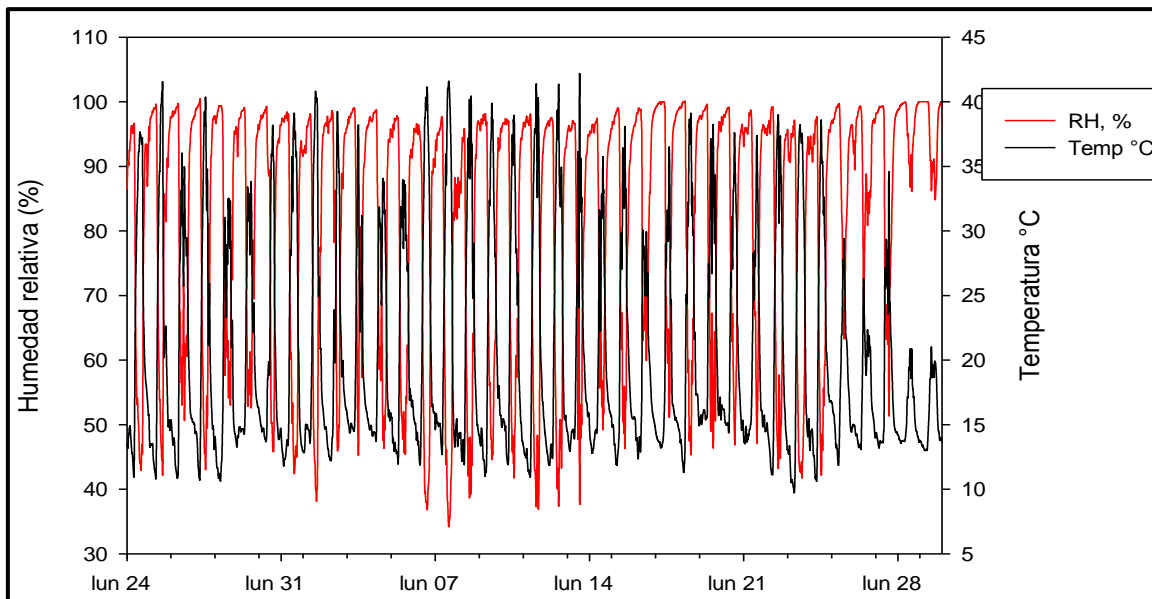


**Figura 5.14.** Registro del comportamiento de la humedad del suelo por sensores.

### 5.3 Condiciones ambientales en el invernadero

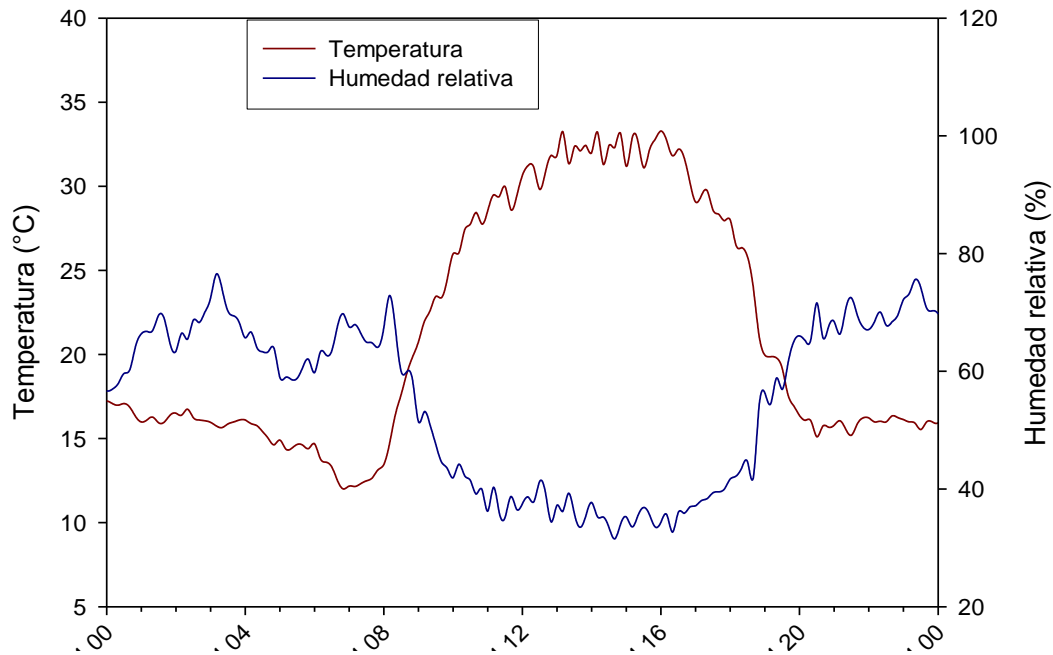
#### 5.3.1 Temperatura y humedad ambiental

Como se ha mencionado en la metodología, la determinación de la humedad y temperatura ambiental dentro del invernadero se hizo a través del equipo Data Logger HOBO u23 Pro v2. En la figura 5.15 se muestra la variabilidad y comportamiento de la temperatura vs humedad relativa ambiental registrada durante el periodo de agosto a septiembre del 2015. El análisis detallado diario indica que, la humedad aumenta de las 2:20 a 8:34 de la mañana y disminuye de las 8:41 a 19:31 horas y vuelve aumentar de las 19:39 a 23:47. Los puntos en que se intersectan la humedad con la temperatura es a las 8.41 y 19:31 horas. Con lo que respecta a la temperatura, los rangos en que éste aumenta o disminuye son contrarios a la humedad, es decir, cuando aumenta la humedad disminuye la temperatura y cuando aumenta la temperatura la humedad disminuye (Figura 5.16).



**Figura 5.15.** Gráfico del comportamiento de la temperatura vs humedad ambiental.

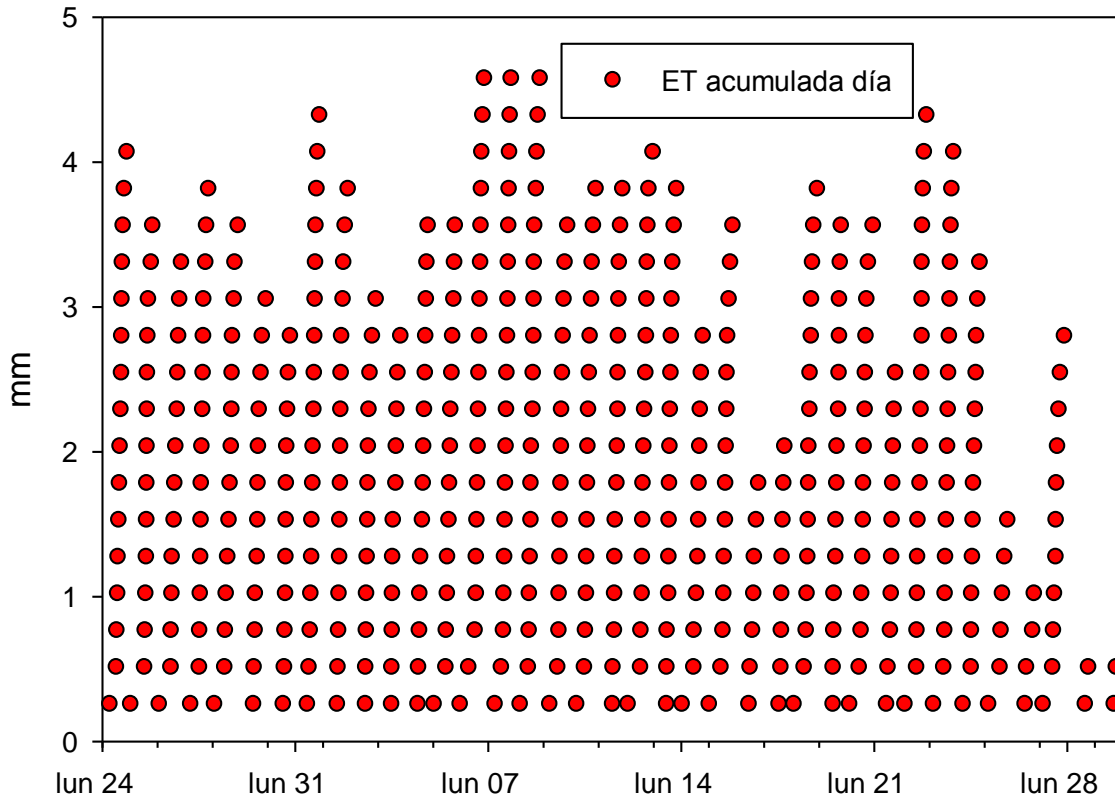




**Figura 5.16.** Gráfico del comportamiento de temperatura vs humedad para un día.

### 5.3.2 Evapotranspiración en el invernadero

Los resultados de la evapotranspiración estimados con el equipo ETgage instalado en el invernadero en estudio se muestran en la gráfica de la figura 5.17. En la gráfica se observan las pulsaciones registradas por el equipo por día durante un cierto periodo de tiempo, donde cada pulsación corresponde a la evaporación de agua equivalente a 0.254 mm. Lo que significa por ejemplo que, para el 24 de agosto del 2015 se registraron 16 pulsaciones que multiplicados por 0.254 mm resulta 4.064 mm, correspondiente a la lámina total de agua evaporada para esta fecha. Tirante de lámina que equivale en volumen a 4.064 litros de agua.



**Figura 5.17.** Gráfico del comportamiento de la evapotranspiración estimada en el invernadero.

## 5.4 Estimación del balance de plaguicidas en la ZE

### 5.4.1 Concentraciones iniciales prevaletientes en el suelo

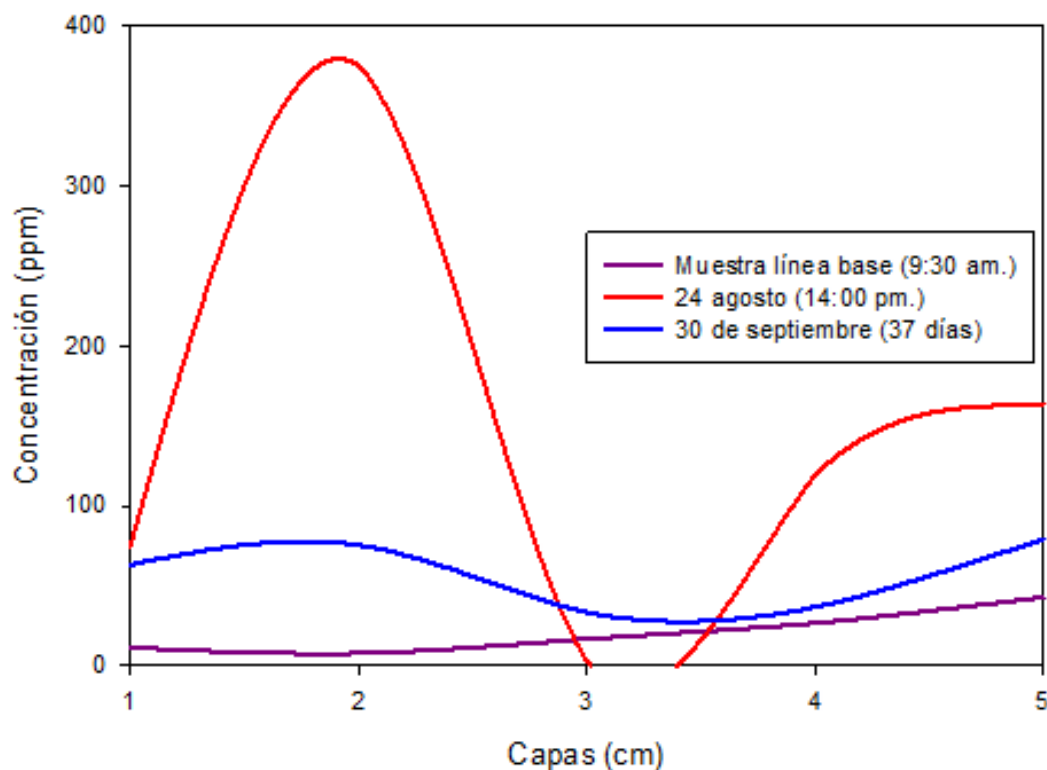
En la tabla 5.18 se muestran los resultados obtenidos debido a los análisis de laboratorio de las muestras de suelo tomadas en la ZE de estudio para determinar la concentración de plaguicidas en éstas. Cabe señalar que, los resultados reportados aquí, sólo representan la cantidad de plaguicida presente en fase adsorbida del suelo de cada capa de análisis de estudio. Lo idóneo habría ser obtenido el total de plaguicida presente en cada capa, es decir, haber cuantificado también la concentración del plaguicida en la fase líquida (lixiviados). Esto se debe a que, son datos primordiales iniciales que darían mayor certeza al realizar un balance de plaguicidas en la fase del suelo, ya que son base de partida para este tipo de análisis de estudio. Es de suma importancia mencionar que, los datos determinados de plaguicidas en las capas del suelo antes de la aplicación son los que se tomaron en la modelación de cada capa como la variable  $C(i)E1$ ,  $C(i)E2$ ,  $C(i)E3$ ,  $C(i)E4$  y  $C(i)E5$ .

**Tabla 5.18.** Resultados del laboratorio del análisis de plaguicidas del perfil del suelo de estudio.

Muestra	Profundidad (cm)	Antes de aplicación 24/08/15 (9:30 am)		Después de aplicación 24/08/15 (14:00 pm)		37 días después de aplicación 30/09/15 (12:00 pm)	
		señal	Concentración (ppm)	señal	Concentración (ppm)	señal	Concentración (ppm)
M1	5	54948	11.07	462406	74.44	388778	62.99
M2	10	32223	7.54	2399362	375.68	468001	75.31
M3	15	89536	16.45	-	-	196854	33.14
M4	30	153834	26.45	750256	119.21	218253	36.47
M5	60	257328	42.54	1033633	163.28	489740	78.69

- no se reportó dato.

Haciendo un análisis de los datos de la tabla, se observa la presencia de una concentración base de plaguicidas importante ya existente en la fase de suelo de estudio (antes de la aplicación), donde la concentraciones más altas están presentes en las fases del suelo más profundas (16.45 - 42.54 ppm), lo que muestra que en efecto, si se ha dado un proceso de lixiviación del plaguicida en el suelo de área de estudio. Respecto a los datos después de la aplicación, a las 14:30 horas las concentraciones en cada capa aumentan debido a la aplicación del plaguicida y a los 37 días, se observa una disminución producto de los procesos de degradación, volatilización y lixiviación. Gráficamente se pueden observar los comportamientos de las concentraciones de los plaguicidas en cada fase del suelo en estudio antes y después de la aplicación en la figura 5.18.



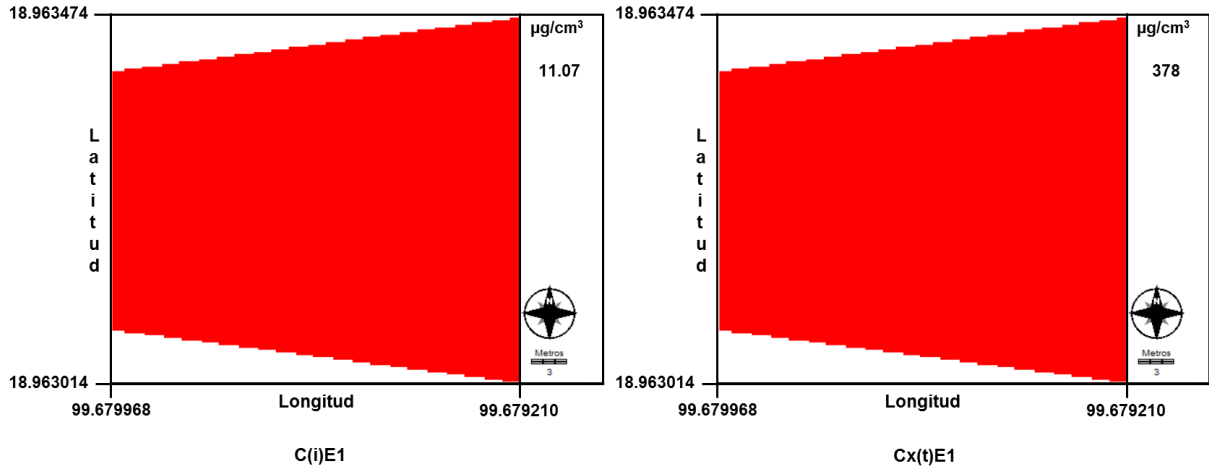
**Figura 5.18.** Concentración del plaguicida antes y después de ser aplicado en el invernadero.

## 5.4.2 Balance de plaguicidas

Los resultados generados producto del modelado hidrogeomático de balance de plaguicidas realizado en la ZE de la ZNS del suelo del invernadero de análisis de estudio se muestran y se describen a continuación por capa de forma espacial y temporal.

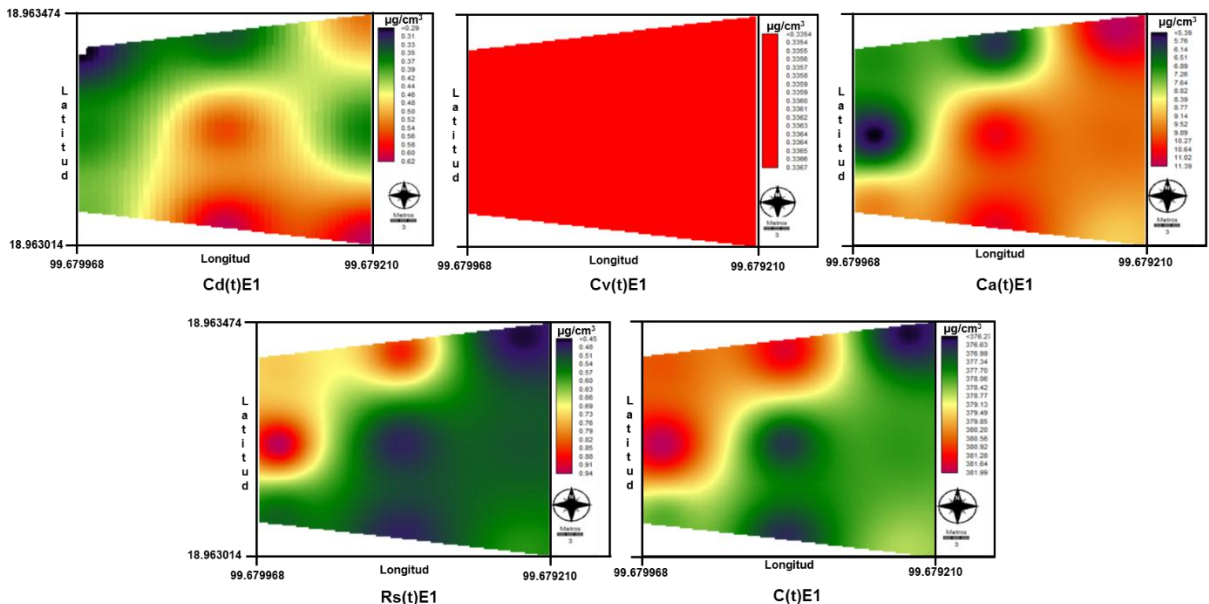
### 5.4.2.1 Primera capa del suelo

Como resultados de la modelación hidrogeomática para la primera capa del suelo son las que se muestran en la figura 5.19 y 5.20, en la cual se observa que, en las zonas del suelo en las que se presenta una mayor degradación o descomposición del plaguicida ((Cd(t)E1) con un rango de entre 0.31 – 0.62  $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ , es donde hay un mayor porcentaje de MO y se presentan los pH altos, lo que indica que, estos son dos de los parámetros determinantes que influyen en la degradación o descomposición de este plaguicida. Sin dejar a un lado por supuesto la influencia que tiene la temperatura, ya que como es del conocimiento, ésta influye determinantemente en la aceleración de la gran actividad bacteriana para una rápida degradación del plaguicida en el medio.



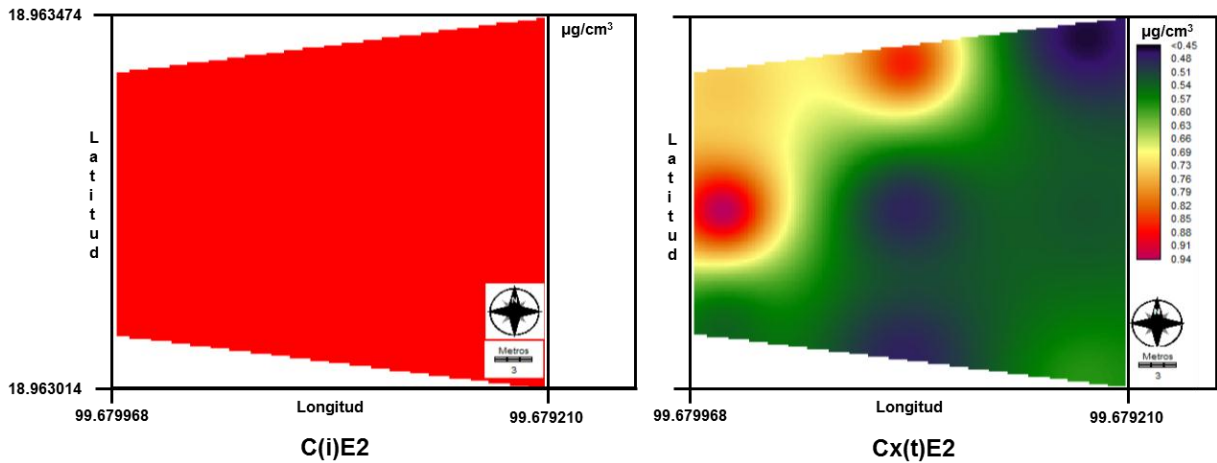
**Figura 5.19.** Balance de plaguicida en la primera capa: entradas.

Con lo que respecta a la volatilización del plaguicida ( $C_v(t)E1$ ), se estima  $0.335 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ , resultado que se apeg a el comportamiento que se encuentra establecido según sus propiedades fisicoquímicas descritos en la tabla 5.9. Sin embargo, con respecto a la adsorción ( $C_a(t)E1$ ), se observan resultados significativos estimados que van de  $5.760$  a  $11.390 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ , donde los valores más altos se presentan en las zonas con mayor presencia de MO. En cuanto a la lixiviación ( $R_s(t)E1$ ), los valores están entre  $0.480$  y  $0.940 \mu\text{g}/\text{cm}^3$  y en la imagen se observa que los valores más altos se presentaron en las zonas donde el pH es más bajo, señal de que un suelo ácido favorece a la lixiviación del endosulfán.

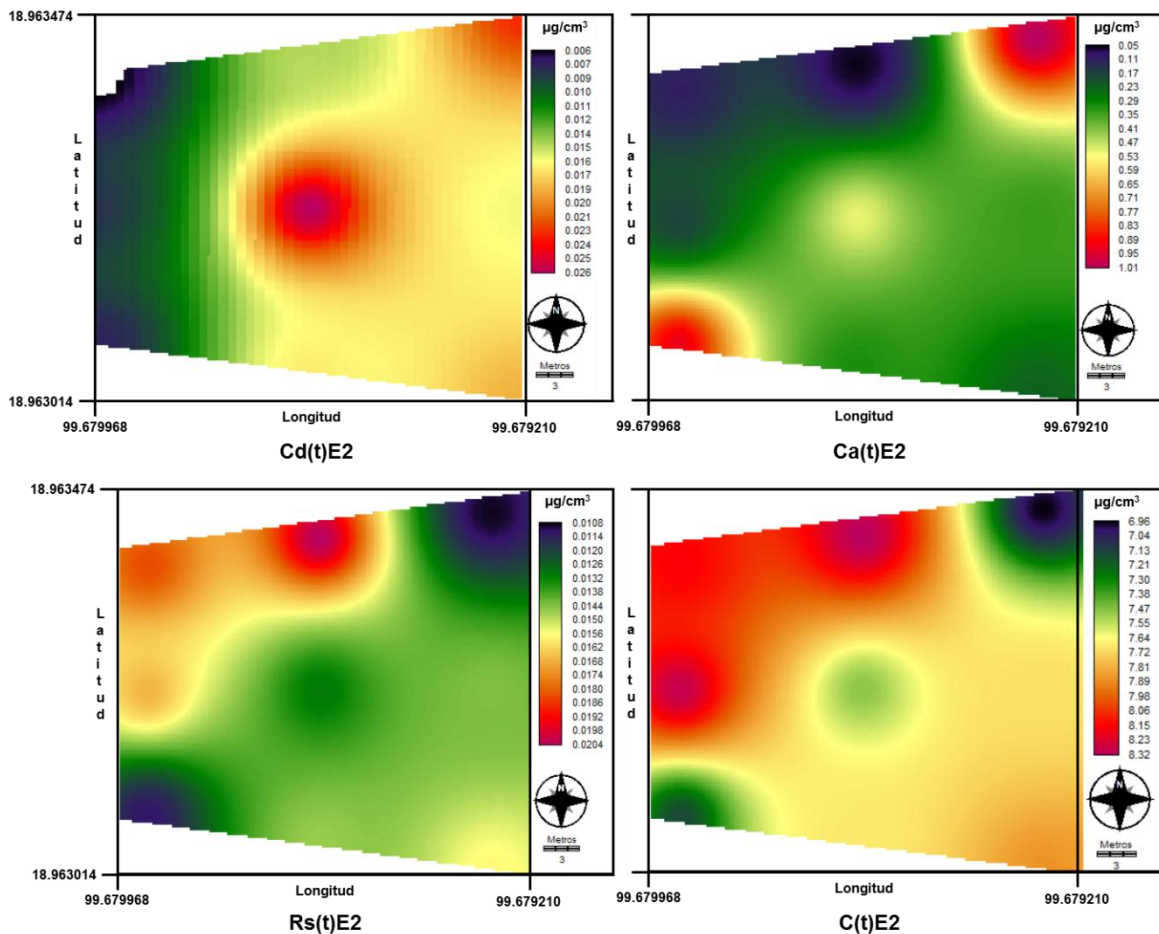


**Figura 5.20.** Balance de plaguicida en la primera capa: salidas.

En general, el análisis de los resultados obtenidos en las siguientes capas del perfil de suelo en estudio, tendieron a presentar el mismo comportamiento de movilidad del endosulfán como en la capa uno, debido a los % de MO y los valores de pH en la capa de suelo.



**Figura 5.21.** Balance de plaguicida en la segunda capa: entradas.



**Figura 5.22.** Balance de plaguicida en la segunda capa: salidas.

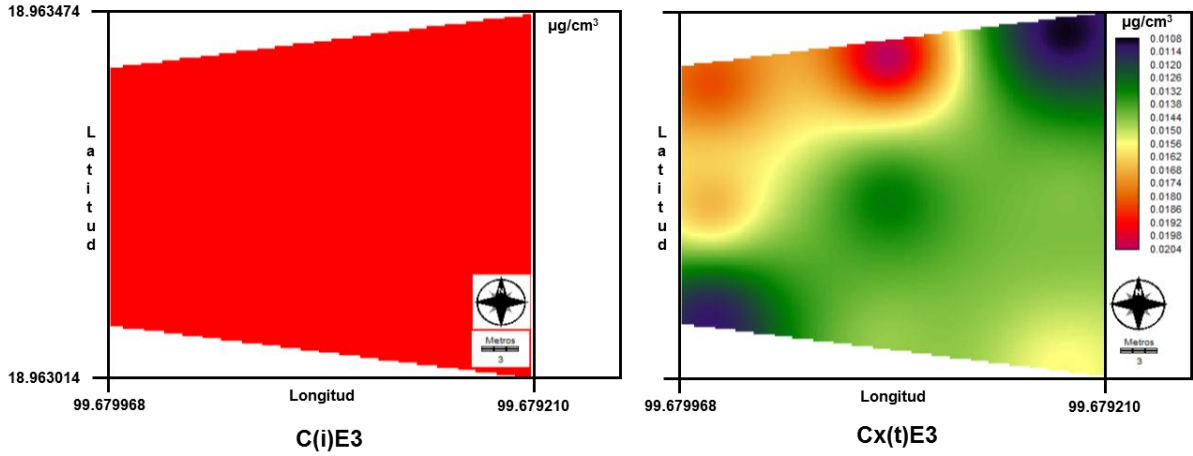


Figura 5.23. Balance de plaguicida en la tercera capa: entradas.

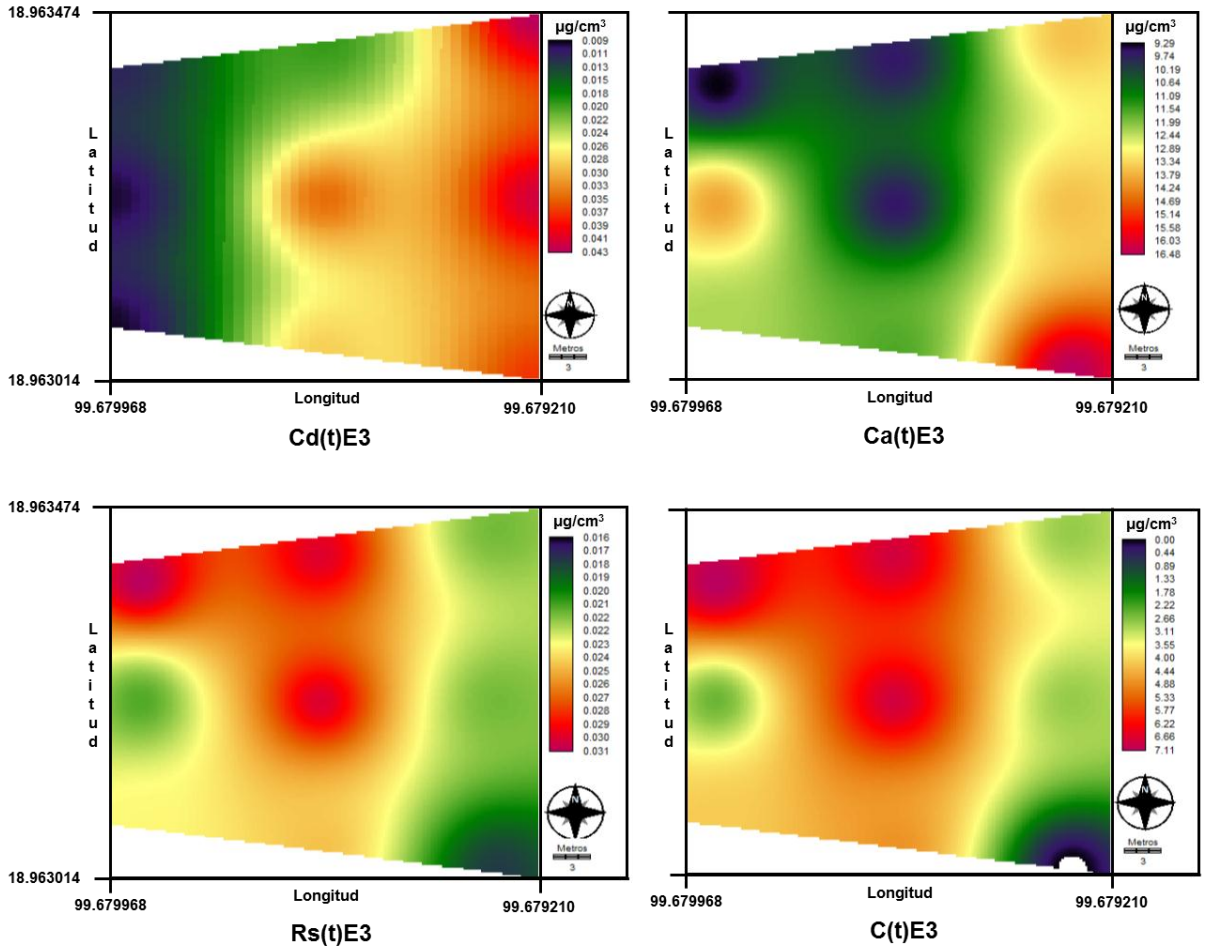


Figura 5.24. Balance de plaguicida en la tercera capa: salidas.



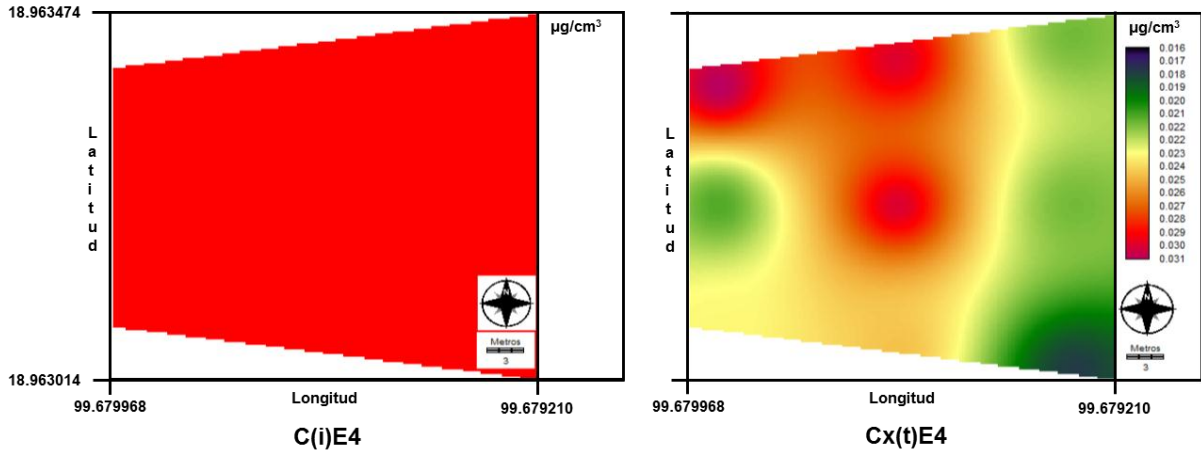


Figura 5.25. Balance de plaguicida en la cuarta capa: entradas.

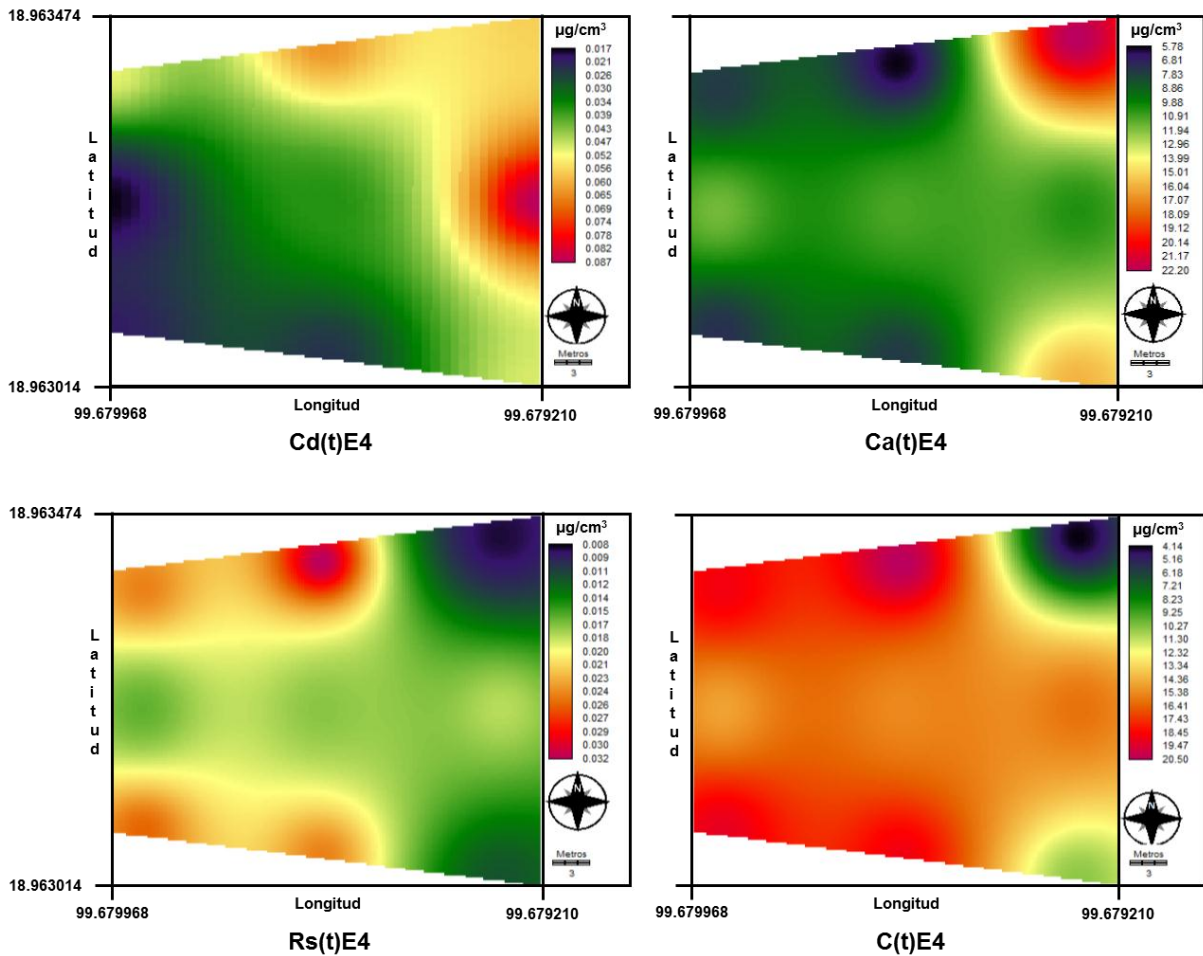


Figura 5.26. Balance de plaguicida en la cuarta capa: salidas.



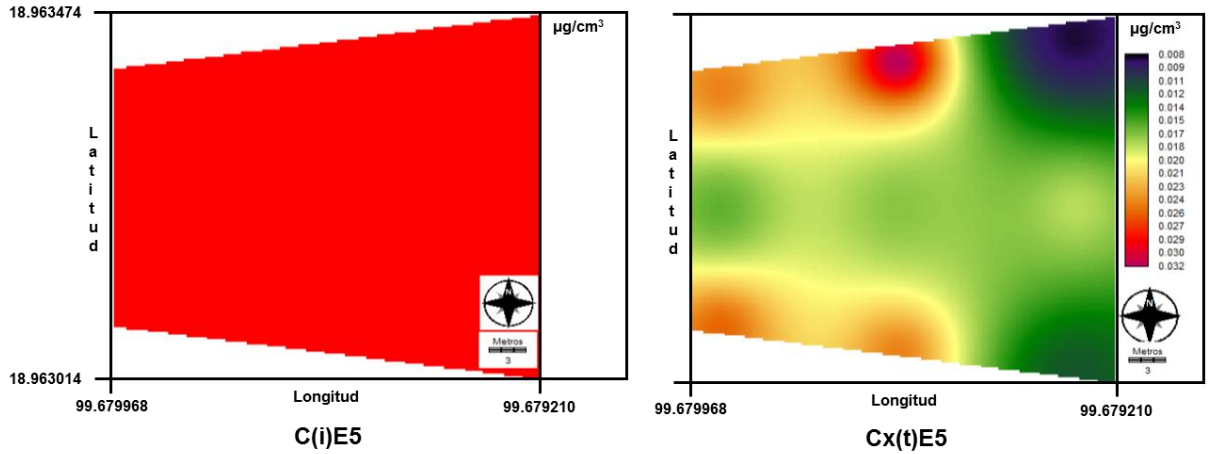


Figura 5.27. Balance de plaguicida en la quinta capa: entradas.

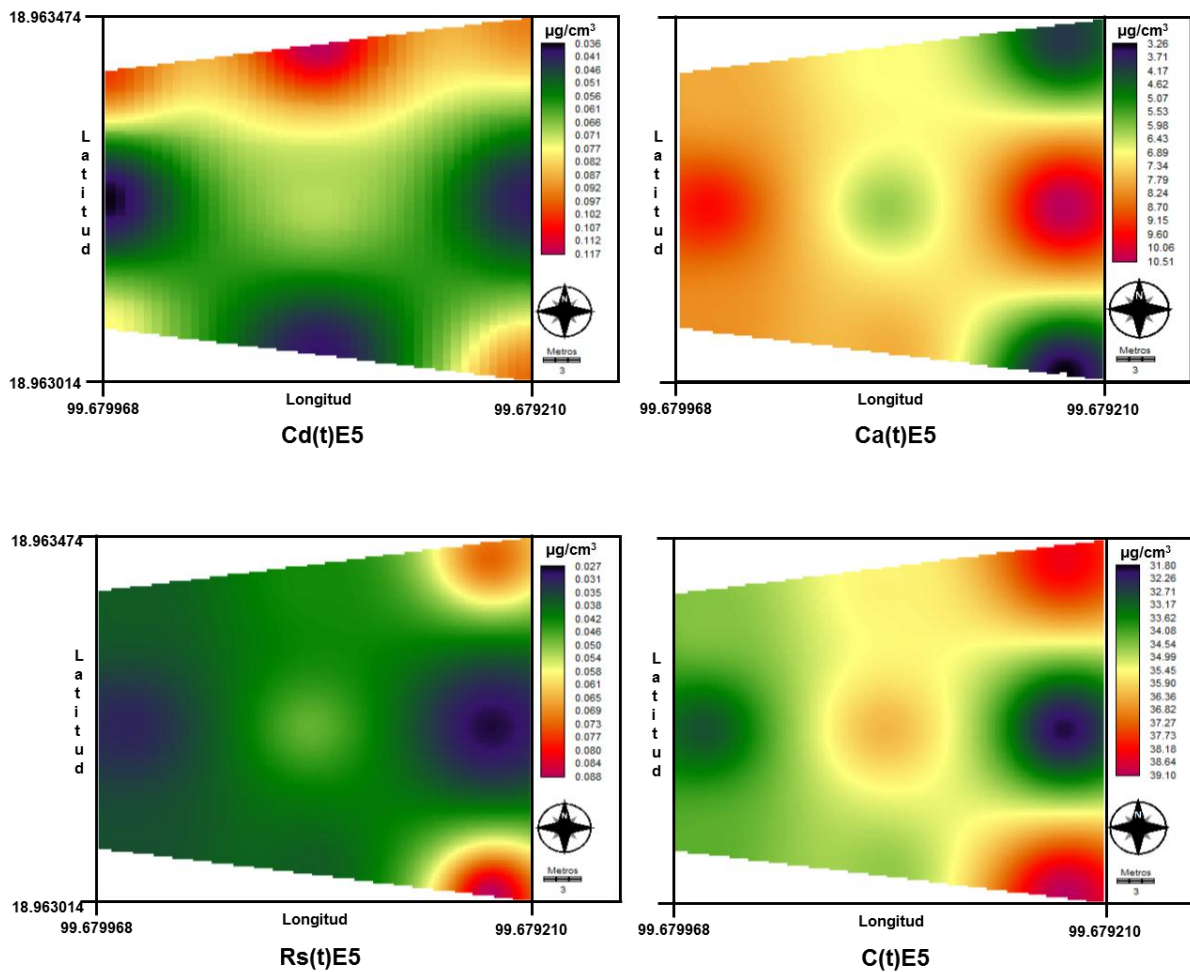


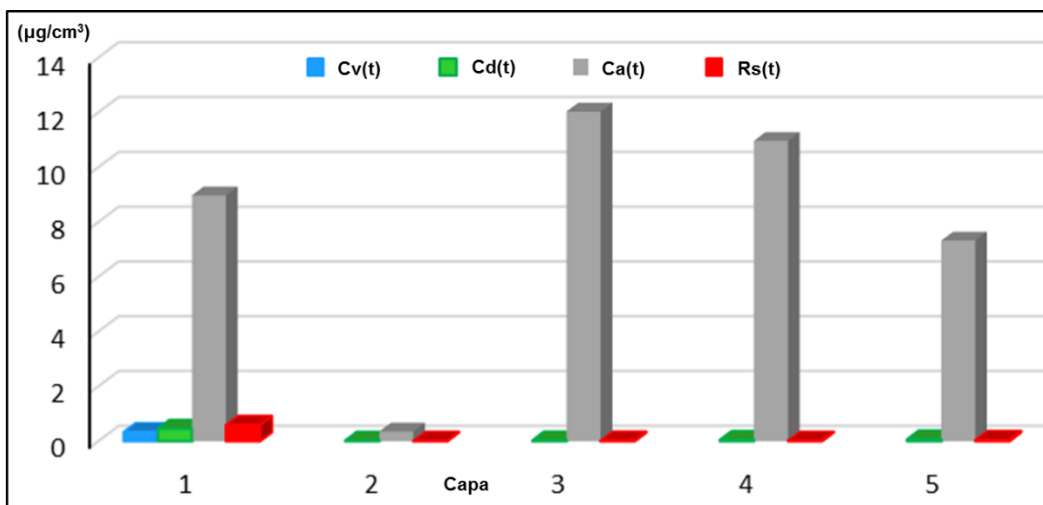
Figura 5.28. Balance de plaguicida en la quinta capa: salidas.

Un resumen de los resultados mostrados a través de las imágenes mostradas anteriormente se presentan en la siguiente tabla 5.19, en la cual se pueden observar de forma sintetizada las medias de cada variable y sus respectivos porcentajes respecto a la concentración total inicial de plaguicida presente en cada capa de suelo.

**Tabla 5.19.** Resumen de las variables de balance por capa: concentraciones medias y porcentajes.

Balance de plaguicida: endosulfán										
Capa	Variable	Cc(11)E1	C(i)E1	Cx(t)E1	Cd(t)E1	Cv(t)E1	Ca(t)E1	Rs(t)E1	C(t)E1	Elm(t)E1
1	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	389.07	11.07	378	0.455	0.337	8.972	0.596	378.710	10.360
	Porcentaje (%)	100	2.845	97.155	0.117	0.087	2.306	0.153	97.337	2.663
2		<b>Cc(22)E2</b>	<b>C(i)E2</b>	<b>Cx(t)E2</b>	<b>Cd(t)E2</b>		<b>Ca(t)E2</b>	<b>Rs(t)E2</b>	<b>C(t)E2</b>	<b>Elm(t)E2</b>
	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	8.146	7.54	0.596	0.015		0.352	0.015	7.764	0.382
	Porcentaje (%)	100	92.560	7.439	0.184		4.321	0.184	95.310	4.689
3		<b>Cc(33)E3</b>	<b>C(i)E3</b>	<b>Cx(t)E3</b>	<b>Cd(t)E3</b>		<b>Ca(t)E3</b>	<b>Rs(t)E3</b>	<b>C(t)E3</b>	<b>Elm(t)E3</b>
	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	16.465	16.45	0.015	0.026		12.033	0.024	4.390	12.075
	Porcentaje (%)	100	99.908	0.091	0.158		73.082	0.146	26.663	73.337
4		<b>Cc(44)E4</b>	<b>C(i)E4</b>	<b>Cx(t)E4</b>	<b>Cd(t)E4</b>		<b>Ca(t)E4</b>	<b>Rs(t)E4</b>	<b>C(t)E4</b>	<b>Elm(t)E4</b>
	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	26.474	26.45	0.024	0.042		10.964	0.018	15.450	11.024
	Porcentaje (%)	100	99.909	0.090	0.159		41.414	0.068	58.359	41.640
5		<b>Cc(55)E5</b>	<b>C(i)E5</b>	<b>Cx(t)E5</b>	<b>Cd(t)E5</b>		<b>Ca(t)E5</b>	<b>Rs(t)E5</b>	<b>C(t)E5</b>	<b>Elm(t)E5</b>
	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )	42.559	42.54	0.019	0.067		7.325	0.042	35.124	7.434
	Porcentaje (%)	100	99.955	0.045	0.157		17.211	0.098	82.530	17.467

Lo anterior se explica de una manera más simple en la gráfica 5.29, en la cual se puede observar que la adsorción del plaguicida es lo que más se presenta en cada una de las capas de perfil de suelo en estudio. Sin embargo, en la primera capa se presentan en mayor proporción los otros procesos de movilidad, que aunque se observan muy bajos en comparación con la adsorción no dejan de ser importantes, sobresaliendo en primera instancia la lixiviación, después la degradación y por último la volatilización.



**Figura 5.29.** Movilidad del endosulfán en la ZE.

Con lo descrito anteriormente, quizá aún no se llega a explicar la consistencia de los resultados estimados a través de la modelación realizada de la movilidad del endosulfán en la ZE, para ello, fue necesario realizar y analizar el grado de correlación de la MO y pH presente en cada una de las capas del suelo entre los procesos de degradación, adsorción y lixiviación estimados en la modelación. Se realizó esto con el objeto de determinar las relaciones entre la degradación, adsorción, lixiviación y el contenido de MO y pH del suelo. Cabe indicar que, con estas correlaciones se hicieron para reflejar las relaciones posibles entre las características de los procesos de degradación, adsorción, lixiviación debido a los componentes del suelo empleados, que explican suficientemente su interacción en los resultados obtenidos en cada proceso o bien el papel desempeñado por un factor determinado.

### 5.5 Análisis de correlación entre parámetros del suelo y las variables del balance

En la figura 5.30 se muestra la gráfica de correlación obtenida entre la MO y la degradación del endosulfán en la primera capa del suelo ( $Cd(t)E1$ ), presenta una correlación positiva y se observa que a medida que aumenta la MO se ve favorecida la degradación del plaguicida.

Un análisis similar entre la MO y la adsorción del plaguicida en la misma capa del suelo se presenta en la figura 5.31, en la cual se observa también una correlación positiva y una estrecha relación entre ambas componentes, ya que la presencia de la MO favorece proporcionalmente la adsorción del plaguicida ( $ca(t)E1$ ).

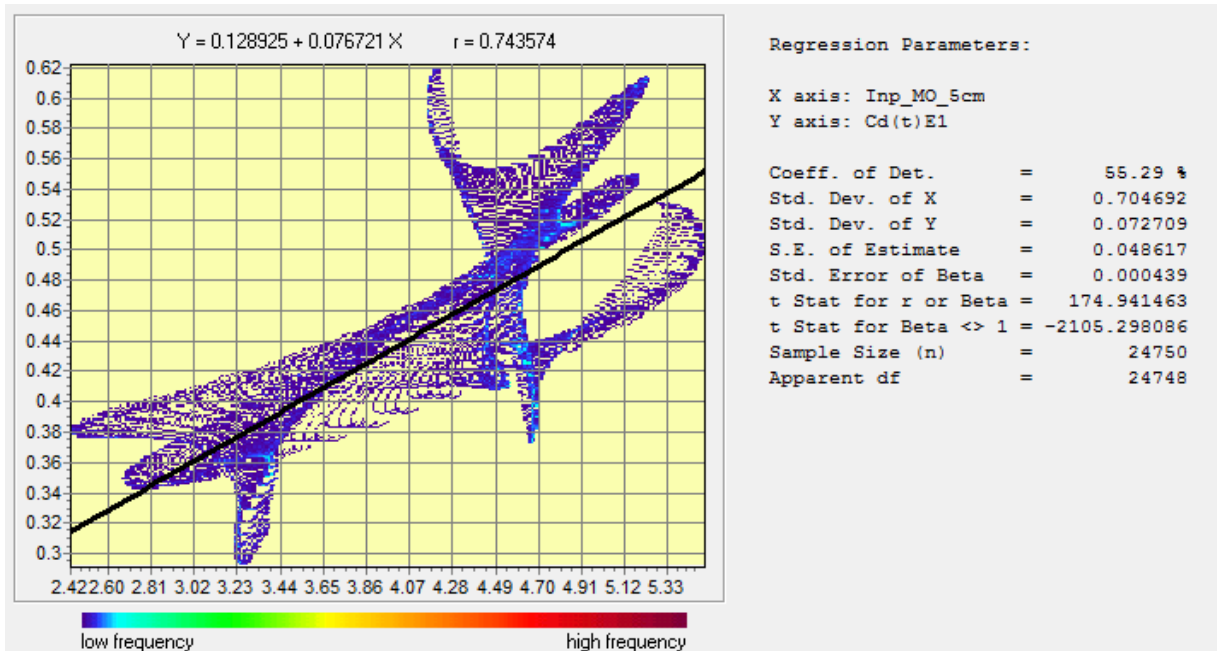


Figura 5.30. Gráfica de correlación: MO vs Cd(t)E1.

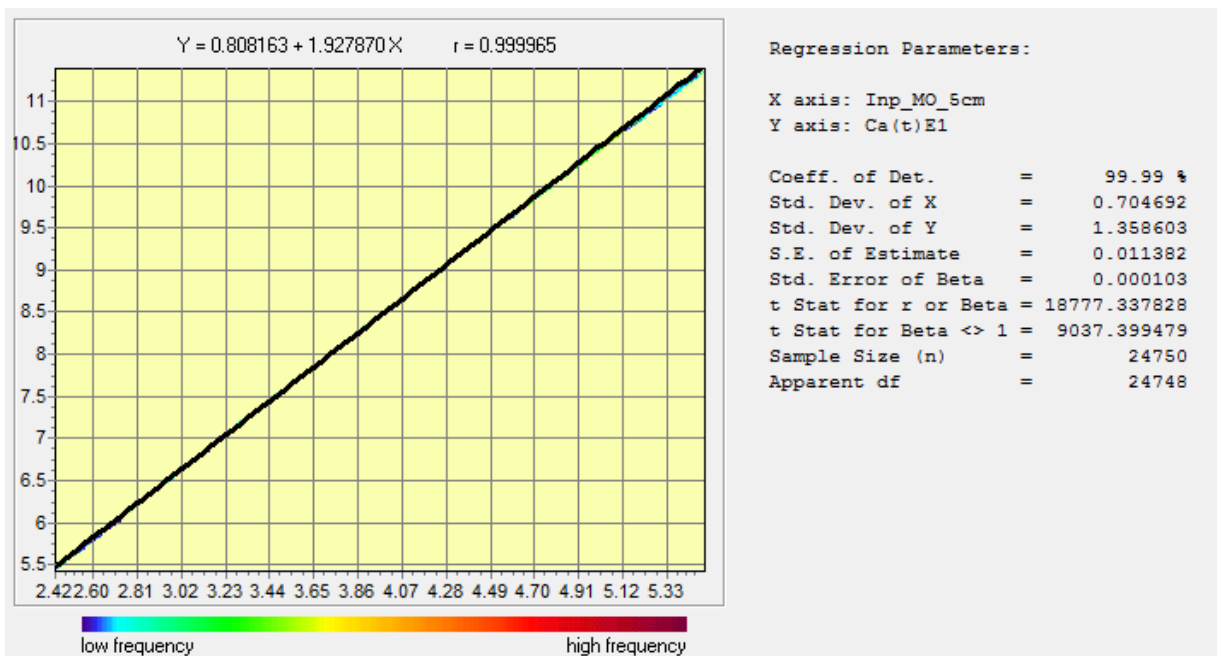
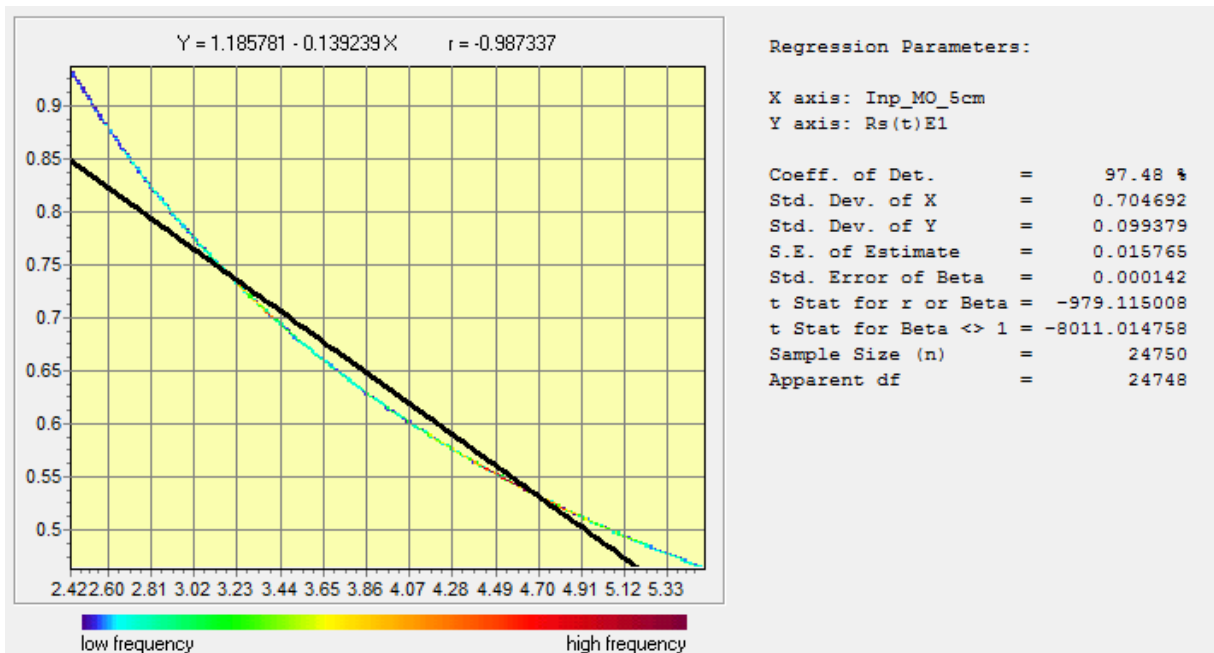


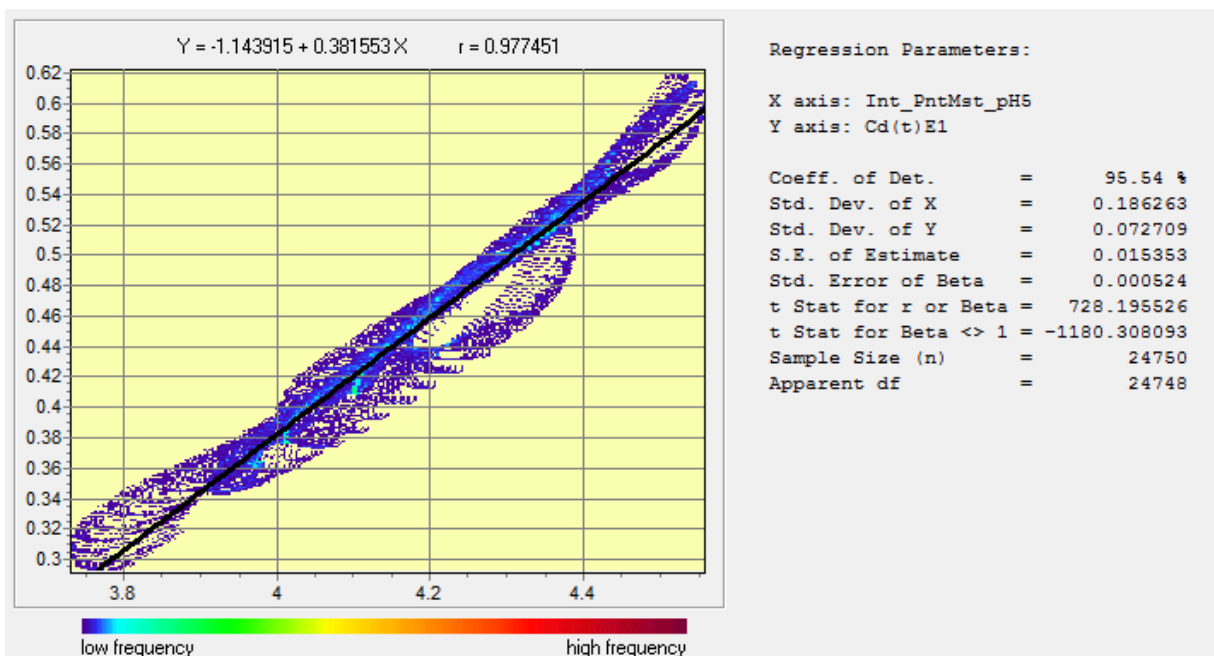
Figura 5.31. Gráfica de correlación: MO vs Ca(t)E1.

Sin embargo, en la misma capa una correlación negativa se presenta entre la MO y la lixiviación del plaguicida (Rs(t)E1 tal como se muestra en la figura 5.32, en el cual se observa que la lixiviación se ve favorecida en la medida que disminuye la MO en el suelo.



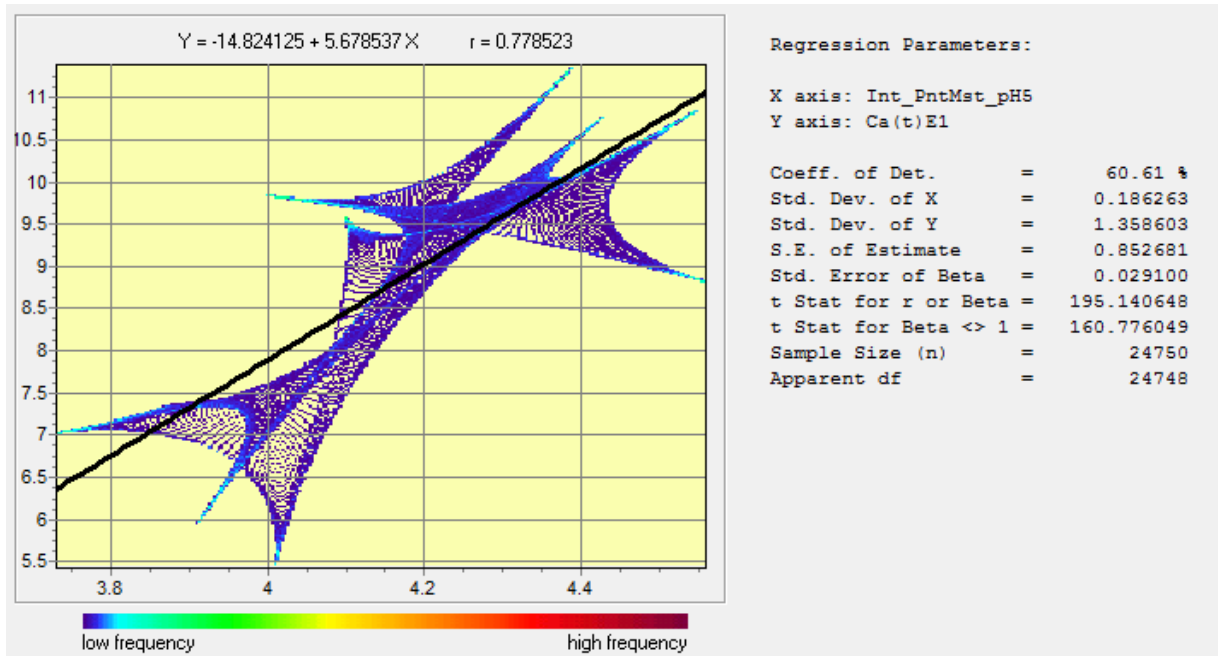
**Figura 5.32.** Gráfica de correlación: MO vs Rs(t)E1.

Ahora, la correlación obtenida entre el pH y la degradación del plaguicida (Cd(t)E1) en la primera capa del suelo se muestra en la figura 5.33, la cual es positiva y se observa que la degradación se ve favorecida en la medida que el pH del suelo tienda a incrementarse.

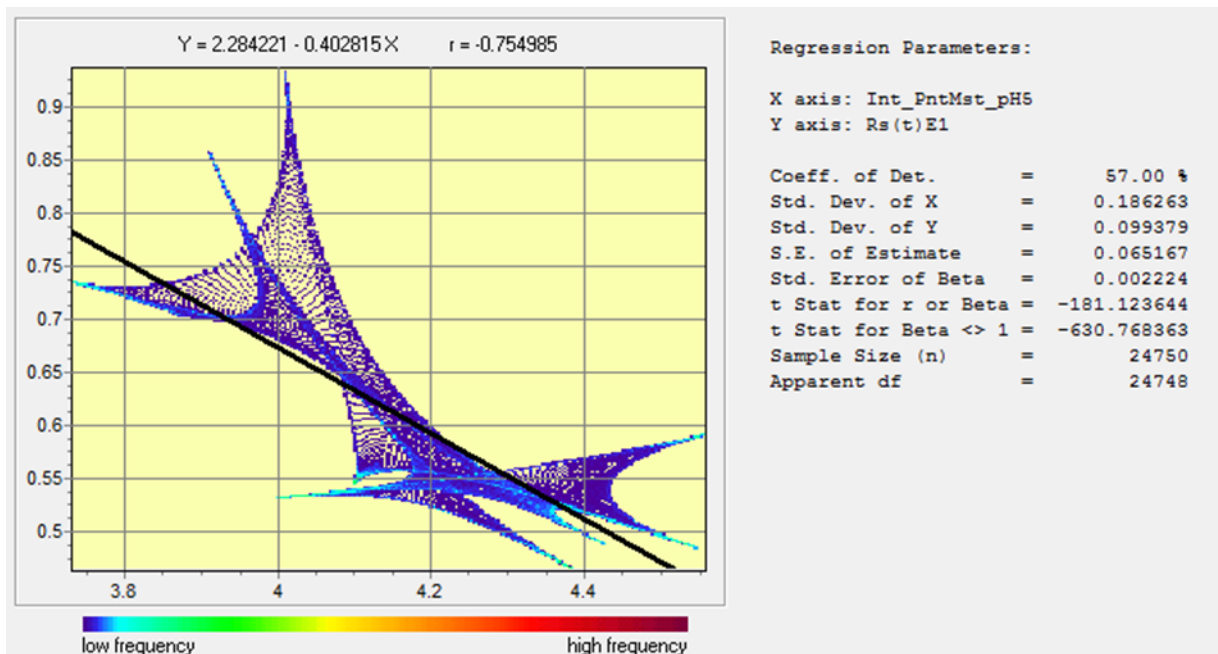


**Figura 5.33.** Gráfica de correlación: pH vs Cd(t)E1.

Respecto a la relación entre el pH y la adsorción del plaguicida (ca(t)E1) se muestra en la gráfica de la figura 5.34, en la cual se observa una correlación positiva y se ven favorecidas los procesos de adsorción en la medida que se vaya incrementando el pH en el suelo.



**Figura 5.34.** Gráfica de correlación: pH vs Ca(t)E1.



**Figura 5.35.** Gráfica de correlación: pH vs Rs(t)E1.

Por último, la relación entre pH y la lixiviación del plaguicida (Rs(t)E1) en la misma capa se muestra en la figura 5.35, en la cual se observa se presenta una correlación negativa debido a que la lixiviación se ve favorecida en medida que el pH del suelo disminuye.

En la tabla 5.20 se muestran de forma resumida todas las correlaciones realizadas en cada una de las capas del suelo de la ZE analizados para estimar la movilidad del endosulfán, en la cual se observan correlaciones similares entre los componentes analizados para la capa uno descritos anteriormente.

**Tabla 5.20.** Coeficientes de correlación obtenidas entre MO, pH vs Cd(t), Ca(t), Rs(t) de perfil de la ZE.

Capa	X	Y	Ecuación	r	X	Y	Ecuación	r
1	MO_5 cm	Cd(t)E1	$Y = 0.128925 + 0.076721X$	0.743574	pH_5 cm	Cd(t)E1	$Y = -1.143915 + 0.381553X$	0.977451
2	MO_10 cm	Cd(t)E2	$Y = 0.005821 + 0.001848X$	0.284087	pH_10 cm	Cd(t)E2	$Y = -0.034862 + 0.010557X$	0.974463
3	MO_15 cm	Cd(t)E3	$Y = 0.002332 + 0.006076X$	0.429598	pH_15 cm	Cd(t)E3	$Y = -0.055106 + 0.017587X$	0.980634
4	MO_30 cm	Cd(t)E4	$Y = 0.026264 + 0.003936X$	0.344164	pH_30 cm	Cd(t)E4	$Y = -0.110955 + 0.033117X$	0.960802
5	MO_60 cm	Cd(t)E5	$Y = 0.115235 - 0.017967X$	-0.513044	pH_60 cm	Cd(t)E5	$Y = -0.197649 + 0.057290X$	0.958928
Capa	X	Y	Ecuación	r	X	Y	Ecuación	r
1	MO_5 cm	Ca(t)E1	$Y = 0.808163 + 1.927870X$	0.999965	pH_5 cm	Ca(t)E1	$Y = -14.824125 + 5.678537X$	0.778523
2	MO_10 cm	Ca(t)E2	$Y = -1.079174 + 0.288968X$	0.981596	pH_10 cm	Ca(t)E2	$Y = -0.249346 + 0.127454X$	0.260031
3	MO_15 cm	Ca(t)E3	$Y = 1.180376 + 2.431731X$	0.999964	pH_15 cm	Ca(t)E3	$Y = 6.897715 + 1.116908X$	0.362208
4	MO_30 cm	Ca(t)E4	$Y = 1.192872 + 2.431876X$	0.999906	pH_30 cm	Ca(t)E4	$Y = -1.038919 + 2.548736X$	0.347667
5	MO_60 cm	Ca(t)E5	$Y = 0.650434 + 2.555730X$	0.999860	pH_60 cm	Ca(t)E5	$Y = 19.636601 - 2.653012X$	-0.608390
Capa	X	Y	Ecuación	r	X	Y	Ecuación	r
1	MO_5 cm	Rs(t)E1	$Y = 1.185781 - 0.139239X$	-0.987337	pH_5 cm	Rs(t)E1	$Y = 2.284221 - 0.402815X$	-0.754985
2	MO_10 cm	Rs(t)E2	$Y = 0.028525 - 0.002785X$	-0.977258	pH_10 cm	Rs(t)E2	$Y = 0.023313 - 0.001819X$	-0.383259
3	MO_15 cm	Rs(t)E3	$Y = 0.045248 - 0.004684X$	-0.988394	pH_15 cm	Rs(t)E3	$Y = 0.034069 - 0.002115X$	-0.351932
4	MO_30 cm	Rs(t)E4	$Y = 0.031146 - 0.003194X$	-0.930635	pH_30 cm	Rs(t)E4	$Y = 0.033032 - 0.003121X$	-0.301689
5	MO_60 cm	Rs(t)E5	$Y = 0.087743 - 0.017544X$	-0.947242	pH_60 cm	Rs(t)E5	$Y = -0.034324 + 0.016431X$	0.520019

Es del conocimiento en el ámbito científico que, los procesos de movilidad de plaguicidas en el ambiente son, en sí mismos, extremadamente complejos y se ven influenciados por una gran cantidad de factores. Lo que lleva como resultado, a que el movimiento de plaguicidas sólo puede ser detectado y cuantificado, después de múltiples y complicadas estimaciones, seguidas de una experimentación intensiva en campo y laboratorio, que debe ser complementada a través del empleo modelos matemáticos para su simulación de movilidad.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Con respecto a la hipótesis planteada en el trabajo se establece que, sí es posible poder estimar la movilidad de plaguicidas en la zona radicular de un cultivo con base en una modelación hidrogeomática a través del SIG TerrSet a partir de la caracterización espacial y temporal de plaguicidas empleados en un invernadero.

En cuanto al objetivo general planteado se concluye que se ha cumplido, debido a que ha sido posible poder desarrollar una modelación hidrogeomática empleando el software de SIG TerrSet para estimar la movilidad espacial y temporal de plaguicidas en la zona radicular del cultivo de flor **Gerbera (*Gerbera jamesonii*)** de un invernadero, en el municipio de Villa Guerrero, Estado de México, México.

Se llega a concluir también que, el primer objetivo específico planteado se llevó a cabo, debido a que fue factible poder recopilar y analizar la información disponible, relacionada con el área de estudio y de los plaguicidas empleados en el cultivo de **Gerbera** en invernadero a través de la revisión bibliográfica y de campo disponible con el fin de sustentar el trabajo.

La conclusión del segundo objetivo específico se pudo llevar a cabo, ya que se pudo elegir un plaguicida a estudiar en función de su toxicidad, persistencia en el medio y sus propiedades fisicoquímicas, para emplearse en la modelación hidrogeomática generada.

Respecto al tercer objetivo específico se concluye que sea ha llevado a cabo, ya que han aplicado ecuaciones de balance de plaguicidas que consideren las principales variables que describen los procesos de movilidad de estos en la ZE de análisis.

En el cuarto objetivo específico se concluye que ha llevado a cabo, ya que se ha efectuado la modelación hidrogeomática en el SIG TerrSet para estimar la movilidad del plaguicida de forma espacial y temporal en la zona radicular del cultivo.

Por último, respecto al quinto objetivo específico planteado, se concluye llevado a cabo, ya se ha hecho una análisis de los resultados de la modelación basados en los parámetros del suelo que determinan la movilidad de los plaguicidas en la ZE que explican su funcionalidad.



Como conclusión general del trabajo de investigación se establece que, los procesos de movilidad de los plaguicidas en el ambiente son, en sí mismos, muy complejos y se ven seriamente condicionados por una gran cantidad de factores. A pesar de ello, el movimiento de plaguicidas puede ser cuantificado a través de múltiples y complicados análisis de laboratorio, basados en una experimentación intensiva en campo, que deben ser complementadas a través del empleo de modelos matemáticos de simulación. Modelos que permiten simular el movimiento del plaguicida a través del suelo (lixiviación), adsorción, volatilización y degradación. Sin embargo, a pesar de la simplificación de un sistema al asumir un flujo en una sola dimensión, los modelos requieren ser retroalimentados con una cantidad de datos relacionados con las condiciones de clima, riego y suelo, así como de información del comportamiento de los plaguicidas bajo condiciones locales de análisis de estudio.

Se ha mencionado en el marco teórico que, ya se han desarrollado modelos que permiten simular el movimiento de plaguicidas en el ambiente, pero que lamentablemente en muchas ocasiones sus requisitos de datos de retroalimentación limitan su aplicación en los estudios. Además, casi todos los modelos matemáticos de simulación son desarrollados para ser aplicados al nivel de parcela y su aplicación a nivel regional involucra una serie de problemas. Uno de los principales problemas, desde el punto de vista práctico, es que es difícil obtener los datos requeridos para todas las parcelas dentro de una región dada. La dificultad anteriormente señalada, es lo que abierto la posibilidad de emplear los SIG como una herramienta, en el cual se pueden desarrollar modelaciones temporal-espacial basados en la disponibilidad de la información a través del empleo de modelos matemáticos que satisfagan los requerimientos disponibles de datos.

La inmensa gama y variedad en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y la gran diversidad de ambientes en que éstas se encuentran y en los que los plaguicidas son empleados, hace que sean necesarios sumar e integrar grandes esfuerzos para su investigación. Por otra parte, la complejidad de las interacciones presentes entre el suelo, agua y las propiedades fisicoquímicas de los plaguicidas empleados es un tema de gran importancia social y ambiental de estudio, aun cuando sea muy complicado desde un punto de vista científico.

## **RECOMENDACIONES**

Continuar con el desarrollo de la modelación para estimar la movilidad de plaguicidas a través de la ZNS hasta su posible incorporación al agua subterránea.

Conjuntar de forma integral una modelación de la movilidad de los plaguicidas en cultivos a cielo abierto.

Implementar basados en los estudios previos señalados anteriormente un módulo hidrogeomático de la modelación de la movilidad de plaguicidas en el ambiente para formar parte de un módulo para la estimación de la contaminación del agua de origen difuso, integrándose a los elementos que conforman el proyecto de la Gestión Integrada del Agua del CIRA.

## **APORTACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS**

El objeto de haber desarrollado una modelación hidrogeomática para estimar la movilidad de la contaminación por plaguicidas de forma espacial y temporal en la ZNS de un invernadero en torno a un SIG, se debe a que la investigación permite:

- Ser replicada en otros invernaderos con la actualización de las variables de campo requeridas de campo como entrada.
- Orientar a los tomadores de decisiones respecto a la problemática en reglamentaciones sobre el uso permisible de plaguicidas en la floricultura.

## REFERENCIAS

- A. Ghafoor, N.J. Jarvis, T. Thierfelder, J. Stenström (2011). Measurements and modeling of pesticide persistence in soil at the catchment scale, *Science of the Total Environment*, volumen 409, pages 1900-19008, April 2011.
- A. Pistocchi, P. Vizcaino, P. Vizcaino (2009). A GIS model-based screening of potential contamination of soil and water by pyrethroids in Europe, *Journal of Environmental Management*, volume 90, pages 3410-3421, August, 2009.
- Aguilar Cristina y Polo Gómez María José (2005). Análisis de la sensibilidad de AnnAGPS en la dinámica de herbicidas en cuencas de olivar. *Estudios de la zona no saturada del suelo* 3: 337-343.
- Agencia europea de productos químicos (2014). Comité para la evaluación de riesgos. Abamectina. Consultado el día 03 de enero de 2014. Consultado en [http://echa.europa.eu/documents/10162/13579/rac\\_bd\\_abamectin\\_en.pdf](http://echa.europa.eu/documents/10162/13579/rac_bd_abamectin_en.pdf)
- Anzalone Álvaro y Silva Alexander (2010). Evaluación de herbicidas sulfonilureas para el control de malezas en cafetales. *Bioagro*, vol. 22, núm. 2, mayo-agosto, 2010. Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto-Cabudare, Venezuela.
- Argueta Hernández Martín (2001). Estudio de evaluación geohidrológica en el acuífero de Tenancingo, Estado de México.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). (2013). *Reseña Toxicológica del Endosulfán*. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
- Bañón Arias Sebastián, González Benavente-García, Fernández Hernández Juan Antonio, Cifuentes Romo Dina (1993). *Gerbera, liliium, tulipán y rosa*. Ediciones Mundi- Prensa.

- Baran, N., Richert, J., Mouvet, C., (2007). Field data and modelling of water and nitrate movement through deep unsaturated loess. *Journal of Hydrology*. 345, 27–37.
- Bernal Valenzo Bernardo (2008). Caracterización de suelos florícolas con acumulación de plaguicidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos x (DRX) en Villa Guerrero México. Tesis de licenciatura en ingeniería en agronomía fitotecnista. Universidad Autónoma del Estado de México, 2008.
- Biblioteca Nacional de Medicina HSDB (2014). Red de datos de toxicología. Consultado el día 04 de enero de 2014. Consultado en <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+6941>.
- Blake, G. R. (1965). Bulk density. pp. 374-390. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Monogr. 9. Part I. Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Bouyoucos, G. C. (1951). A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agron. J.* 43: 434-438
- Brady, N. C. y R. R. Weil (1996). Soils and chemical pollution. Chapter 18 of book. *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall International.
- Caballero, García de Vinuesa Juan Ignacio (1986). Principales parámetros para el estudio del comportamiento de los plaguicidas. *Bol. San. Veg, Plagas*, 12: 103-114.
- Campos, A. (1998). *Proceso del ciclo hidrológico*. 3ª reimpresión. Editorial Universitaria Potosina. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Centro de Recursos Idrisi (2018). Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMex. México). <http://idrissi.uaemex.mx/idrissi.mexico@gmail.com>.
- Centro Nacional de información de plaguicida (2014). Consultado el día 03 de enero de 2014. Consultado en <http://npic.orst.edu/ingred/ppdmove.htm>

CICOPLAFEST (2004). Catálogo oficial de plaguicidas. México.

COFEPRIS (2015). Catálogo de plaguicidas. Consultado el día 13 de enero de 2015.

<http://www.cofepris.gob.mx/AZ/Paginas/Plaguicidas%20y%20Fertilizantes/CatalogoPlaguicidas.aspx>

Cornelis, Christa; Schoeters, Greet; Kellen, Eliane; Buntinx, Frank; Zeegers, Maurice (2009). Development of a GIS-based indicator for environmental pesticide exposure and its application to a Belgian case-control study on bladder cancer, *Int. J. Hyg. Environ. Health*, volumen 212, pages 172-185, March 2009.

CRI (2018). Centro de Recursos Idrisi. Universidad Autónoma del Estado de México.

C. Tarazona, JM Carrasco, C. Sabater (2003). Control de los plaguicidas de arroz en la ONU Sistema acuático del parque natural de la Albufera, Valencia, España. La evaluación del peligro .AAM Del Re, E. Capri, L. Padovani, M. Trevisan (Eds.), *Actas de la Química de Plaguicidas XII Simposio, pesticidas en el Aire, Las Plantas, el Consuelo y El Sistema de Agua, La Goliardica Pavese, Piacenza , Italia* (2003), pp 727-736..

Dabrowski JM, Peall SK, Van Niekerk A, Reinecke AJ, Day JA, Schulz R (2002). Predicting runoff-induced pesticide input in agricultural subcatchment surface waters: linking catchment variables and contamination. *Water Res* 2002, 36, 4975-4984.

De Bruyn B, Freissinet C, Vauclin M (2006). An indice for pesticide vulnerability of surface waters: assessment on the Lysse catchment (Savoie). *Houille Blanche-Revue Internationale de l'Eau* 2:106–112. doi: 10.1051/lhb: 200602014.

Disemina (2012). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadísticas del Sector Agroalimentario y Pesquero. La Floricultura en México. Número 89. México.

Doran, J. W. (1996). Methods for assessing soil quality. En: J.W. Doran and Alice J. Jones (Ed.). *SSSA Special Publ. 49. Soil Science Society of America Inc.* Madison, WI.

Eastman J. R. (2016). IDRISI Taiga. Guide to GIS and Image Processing. Manual Versión 16.00 Clark Labs, Clark University. USA.pdf 328.

EPA (2012). Plaguicidas, <http://www.epa.gov/pesticides/> (septiembre, 2012).

Estrada Bernal José Javier y Nava Domínguez Gabriel Edgardo. (1996). Uso y manejo de pesticidas en la zona florícola de Villa Guerrero, México. Tesis de licenciatura en ingeniería en agronomía fitotecnista. Universidad Autónoma del Estado de México.

Estrada Flores Rafael (2002). Estudio de plagas y enfermedades del cultivo de gerbera (*Gerbera jamesonii* Bolus) a través de encuestas en el municipio de Villa Guerrero. Tesis de licenciatura en ingeniería en agronomía fitotecnista. Universidad Autónoma del Estado de México, 2002.

Ezra J. Mrema, Federico M. Rubino, Gabri Brambilla, Angelo Moretto, Aristidis M. Tsatsakis, Claudio Colosio (2013). Persistent organochlorinated pesticides and mechanisms of their toxicity. *Toxicology*, Volume 307, 10 May 2013, Pages 74-88.

FAO 1983. Guidelines for the control of soil degradation. UNSF and FAO. Rome.

FAO (1997). Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55) (1997).

FAO (2009). Guía para la descripción de suelos (Traducido y adaptado al castellano por Ronaldo Vargas). Cuarta edición. Proyecto FAO-SWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia) Roma, Italia. 111 pp.

FAO (2012). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación <http://www.fao.org/agriculture/crops/obsolete-pesticides/what-dealing/obs-pes/es/>. (octubre, 2012).

Franco, P.R. (2008). Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la disponibilidad de recursos hídricos. Tesis doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMex. Estado de México.

- Gabriels, D; Lobo, D,; Pulido, M y Florentino, A. (2006). "Venesuelos". Revista de la sociedad venezolana de la ciencia del suelo y del Instituto de Edafología de la facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. Vol. 14.
- Gamboa Zúñiga Leda (1991). Cultivo de gerbera. Primera edición. San José Costa Rica, EUNED/CINDE, 1991. 64 p.
- García Gutierrez Cipriano y Rodríguez Meza Guadalupe Durga (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. Ra Ximhai, septiembre - diciembre, año/Vol. 8, Número 3. Universidad Autónoma Indígena de México. Mochicahui, El Fuerte, Sinaloa. pp. 1-10.
- Garibay, C.G. (2006). Qué tan segura es el agua de nuestro uso cotidiano. Instituto de medio ambiente y comunidades humanas. ggaribay@cucba.udg.mx.
- Gascuel-Odoux C, Arousseau P, Cordier MO, Durand P, Garcia F, Masson V, Salmon-Monviola J, Tortrat F, Trepos R (2009). A decision-oriented model to evaluate the effect of land use and agricultural management on herbicide contamination in stream water. Environ Model Softw 24:1433–1446. doi:10.1016/j.env soft. 2009.06.002.
- Georges F. Backoulou, Norman C. Elliott, Kristopher Giles, Mpho Phoofolo, Vasile Catana (2011). Development of a method using multispectral imagery and spatial pattern metrics to quantify stress to wheat fields caused by Diuraphisnoxia. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 75, Issue 1, January 2011, Pages 64-70.
- Gevao, B.; Jones, K.C. (2002). Pesticides and Persistent Organic Pollutants. En: Haygarth, P. M.; Jarvis, S. C. (Eds.) Agriculture, Hydrology and Water Quality. CAB International, Oxon, United Kingdom, p. 83-106.
- Gómez, A. M.A. (2005). Desarrollo de una metodología geomática para la evaluación por subcuenca de indicadores de deficiencias en tratamiento de aguas residuales. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMéx. Estado de México, México.

Hernández González Margarita Marina, Jiménez Garcés Clementina, Jiménez Albarrán Fernando R y Arceo Guzmán Mario E. (2007). Caracterización de las intoxicaciones agudas por plaguicidas: uso de agroquímicos en una zona agrícola del Estado de México, México.

Hojas de datos de seguridad switch, syngenta (2014). Consultado el día 1 de enero de 2014.  
[http://www.syngenta.com.mx/Data/Sites/1/descargables/hds/hds\\_switch\\_625\\_wg.pdf](http://www.syngenta.com.mx/Data/Sites/1/descargables/hds/hds_switch_625_wg.pdf)

Holvoet K, van Griensven A, Seuntjens P, Vanrolleghem PA (2005). Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT. *Phys Chem Earth* 30(8–10):518–526. doi:10.1016/j.pce.2005.07.006.

Holvoet K, van Griensven A, Gevaert V, Seuntjens P, Vanrolleghem PA (2008). Modifications to the SWAT code for modelling direct pesticide losses. *Environ Modell Softw* 23(1):72–81.

Hua Pan, Linhua Jiang, Maxim E. Kuil (2012). Pesticide monitoring in the Netherlands: can it be improved. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, Volume 184, Number 5, Pages 3133-3139.

Instituto Nacional de Ecología (2004). Características fisicoquímicas de los plaguicidas y su transporte en el ambiente, México.  
[http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas\\_fyq\\_plaguicidas.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/descargas/caracteristicas_fyq_plaguicidas.pdf), 2004.

INE (2011). Diagnóstico de la situación del endosulfán en México.

INE (2012). Instituto Nacional de Ecología México.  
<http://www2.ine.gob.mx/sistemas/plaguicidas/lprohibi.html> (octubre, 2012).

INEGI (1992). Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. 21 pp.

Infoagro (2014). El cultivo de la gerbera. [En línea]. [Consultado el 30 de marzo de 2014].  
Disponible en <http://www.infoagro.com>.



Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2005). Síntesis Informativa Geográfica del estado de México, paginas 139.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Villa Guerrero, México. Clave geoestadística 15113. 2009.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Censo de Población y vivienda 2010.

Kaminska IA, Oldak A, Turski WA (2004). Geographical information system (GIS) as a tool for monitoring and analysing pesticide pollution and its impact on public health. *Ann Agric Environ Med.* 2004; 11(2):181-184.

Kanwar, J.K., Kumar, S., (2008). In vitro propagation of Gerbera - a review. *Hort. Sci.* 35, 35–44.

Kester J. E. (2001). Endocrine-disrupting chemical. En *Clinical Environmental Health and toxic exposures*. Lippincot William and Wilkins.

Koji Tani, Yoshihiko Matsui, Kensuke Iwao, Motoyuki Kamata, Taku Matsushita (2012). Selecting analytical target pesticides in monitoring: Sensitivity analysis and scoring. *Water Research*, Volume 46, Issue 3,1. March 2012, Pages 741-749.

Kovach J., Petzoldt, C., Degnil J. and Tette J (1992). A method to measure the environmental impact of pesticide.

Krueger, Tobias; Page, Trevor; Hubacek, Klaus; Smith, Laurence; Hiscock, Kevin (2012). The role of expert opinion in environmental modeling, *Environmental Modelling & Software*, volume 36, pages 4-18, October 2012.

Jes Jessen Rasmussen, Peter Wiberg-Larsen, Annette Baattrup-Pedersen, Rikke Juul Monberg, Brian Kronvang (2012). Impacts of pesticides and natural stressors on leaf litter decomposition in agricultural streams. *Science of The Total Environment*, Volume 416, February 2012, Pages 148-155.

Jolanta Fenik, Maciej Tankiewicz, Marek Biziuk (2011). Properties and determination of pesticides in fruits and vegetables. Trends in Analytical Chemistry, Vol. 30, No. 6.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada el 28 de enero de 1988. Última reforma publicada DOF 06-04-2010.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LEGEPEGIR), publicada en el D.O.F. el 19 de junio de 2007.

Ley General de Salud, publicada en el D.O.F. el 26 de abril de 2007.

López Geta, Juan Antonio; Martínez Navarrete, Carlos; Moreno Merino, Luis; Navarrete Martínez, Paloma (1992). Las aguas subterráneas y los plaguicidas.

Luz Ma. García de la Parra, L. Junley Cervantes Mojica, Carolina González Valdivia, Francisco J. Martínez Cordero, Gabriela Aguilar Zárate, Pedro Bastidas Bastidas, Miguel Betancourt Lozano (2012). Distribution of Pesticides and PCBs in Sediments of Agricultural Drains in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico.

Madier S. (2007). From the measurement to the modelling of transfers of pesticides on the catchment scale: quantification of the uncertainties and definition of sampling strategies. Ph.D. Agro Paris tech, Paris, France (in French).

Marcela G. Ribeiro, Camilla G. Colasso, Paula P. Monteiro, Walter R. Pedreira Filho, Mauricio Yonamine (2012). Occupational safety and health practices among flower greenhouses workers from Alto Tietê region (Brazil). Science of the Total Environment 416 (2012) 121–126

Manzano, S. L.R. (2005). Diseño de base de geodatos censales demográficos e implementación geomática de indicadores e índices hídricos. Tesis de Maestría. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMéx. México

- Mariana Gonzalez, Karina S. B. Miglioranza, Valeria M. Shimabukuro, Orlando M. Quiroz Londoño, Daniel E. Martínez, Julia E. Aizpú and Víctor (2012). Surface and groundwater pollution by organochlorine compounds in a typical soybean system from the south Pampa, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 2012, Volume 65, Number 2, Pages 481-491.
- Martínez, V. H. (2010). Desarrollo de una metodología hidrogeomática para estimar la contaminación difusa en aguas superficiales de una cuenca. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de la UAEMéx. México.
- Maxwell, S. K., Airola, M., & Nuckols, J. R. (2010). Using Landsat satellite data to support pesticide exposure assessment in California. *International Journal of Health Geographics*, 9, 46.
- M. Oliva, J. C. Rodríguez G. Silva (2005). Estudio exploratorio de los problemas de salud humana derivados del uso de plaguicidas en Bella Vista, Estado de México, México. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica) No. 76 p. 71-80, 2005.*
- M-MMP-1-02/03 Normativa para la Infraestructura del Transporte. Libro: MMP Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales. Parte 1: Suelo y materiales para terracerías. Título: 02 Clasificación de Fragmentos Rocas y Suelos.
- Morell Ignacio y Fagundo Juan R. Contribuciones a la investigación y gestión del agua subterránea. Editorial: Universitat Jaume I. Col·lecció Summa. Ciències experimentals, nº 4, Valencia, 1996.
- Morell Evangelista Ignacio, Candela Lucia (1993). La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas. Teoría, medición y modelos. CIMNE. 325 pp. Barcelona.
- Morell Evangelista Ignacio, Candela Lucia (1998). Plaguicidas aspectos ambientales, analíticos y toxicológicos. Castello de la Plana: Publicacions de la Universitat Jaume I, cop.

Morell Evangelista Ignacio y Hernández Félix. El agua en Castellón. Un reto para el siglo XXI. Editorial Universidad Jaume. 538 paginas. 2002.

Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2014). La situación demográfica en el Mundo. Informe conciso. 38 páginas.

Organización Mundial de la Salud (1990) Public health impact of pesticides used in agricultura.

Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2012). Comisión del Codex Alimentarius: manual de procedimiento. Definiciones para los fines del codex alimentarius. Fuente electrónica. <http://www.fao.org/docrep/W5975S/W5975S00.htm> consultado el día 10 de junio de 2012.

Ortiz Oscar y Pradel Willy (2009). Guía introductoria para la evaluación de impactos en programas de manejo integrado de plagas (MIP). Centro Internacional de la Papa. Proyecto MIP.

Oszkinis, K.; A. Lisiecka.Gerbera.Ed.EDAMEX.1990, 135p

Oviedo Zuñiga Ana M., Karam Calderón Miguel A., Rodríguez García Claudia (2003). Percepción de riesgo por el uso de plaguicidas en niños escolares, Villa Guerrero, Estado de México. Revista toxicológica en línea. <http://www.sertox.com.ar/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=375> (enero, 2013).

PAN Base de datos plaguicidas-químicos: Base de datos ciromazina. Consultado el día 04 de enero de 2014. [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC33510](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC33510).

PAN Base de datos plaguicidas químicos: Base de datos clorpirifos. Consultado el día 04 de enero de 2014. Consultado en [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC33510](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC33510).

PAN Base de datos plaguicidas-químicos: Base de datos ciprodinil. Consultado el día 01 de enero de 2014. Consultado en [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC35774](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC35774)

PAN Base de datos plaguicidas-químicos: Base de datos ciprodinil. Consultado el día 01 de enero de 2014. Consultado en [http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC35910](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC35910)

Pimentel D, Culliney TW, Bashore T. Public health risks associated with pesticides and natural toxins in foods. Integrated pest management world, textbook. New York., USA: Universidad Minnesota; 1996.

Ramos Corona Alfonso (2006). Modelación y análisis de la dispersión de plaguicidas de la zona florícola de Villa Guerrero y Tenancingo utilizando el elemento finito apoyado en un sistema de información geográfica. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma del Estado de México, 2006.

RAPAM. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas México. Consultado el día 03 de enero de 2015. Consultado en <http://www.rapam.org/>

Reseña Toxicológica del clorpirifos. Departamento de salud y servicios humanos de EE.UU. Consultado el día 03 de enero de 2014. Consultado en <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp84.pdf>

Rolando Payán-Rentería MSc, Guadalupe Garibay-Chávez PhD, Raul Rangel-Ascencio MSc, Veronica Preciado-Martínez MSc, Laura Muñoz-Islas MSc, Claudia Beltrán-Miranda PhD, Salvador Mena-Munguía PhD, Luis Jave-Suárez PhD, Alfredo Feria-Velasco PhD & Ruth De Celis PhD (2012). Effect of Chronic Pesticide Exposure in Farm Workers of a Mexico Community, Archives of Environmental & Occupational Health, 67:1, 22-30.

Romero, M.; J. Dorea y A Granja (2000). Concentrations of organochlorine Pesticide in milk of Nicaragua of Mothers, Arch Environ Health 55(6): 411-417.

- Sanderson I.D.; Lowe, M. 2002. Ground-Water sensitivity and vulnerability to pesticides, Cache Valley, Cache County, Utah. Miscellaneous publication 02-8. Utah Geological Survey, Salt Lake City UT.
- Semarnat. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México: compendio de estadísticas ambientales 2002. Semarnat, México. 2003.
- Spadotto, C.A.; Gomes, M.A.F.; Hornsby, A.G. 2002. Pesticide leaching potential assessment in multilayered soils. *Pesticidas: R. Ecotoxicol. e Meio Ambiente*, Curitiba 12: 1-12.
- .
- P. Kurasamy, S. Govindaraj, S. Vignesh, R. Babu Rajendran, R. Arthur James (2012). Anthropogenic nexus on organochlorine pesticide pollution: a case study with Tamiraparani river basin, South India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, Volume 184, Number 6, Pages 3861-3873.
- Ronan Trépos, Véronique Masson, Marie-Odile Cordier, Chantal Gascuel-Odoux, Jordy Salmon-Monviola (2012). Mining simulation data by rule induction to determine critical source areas of stream water pollution by herbicides. *Computers and Electronics in Agriculture*, In Press, Corrected Proof, Available online 21 February 2012.
- SAGARPA (2006). Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Boletín SAGARPA número 036, 2006.
- SAGARPA (2013). Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (marzo, 2013)
- Schnitzer M. (2000). Life Time Perspective on the Chemistry of Soil Organic Matter. D. L. Sparks(Ed.). *Advances in Agronomy Academic Press*. 98:3-58.
- Sylvain Payraudeau and Caroline Gregoire (2012). Modelling pesticides transfer to surface water at the catchment scale: a multi-criteria analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, Volume 32, Number 2, Pages 479-500.

- Instituto Tecnológico y Estudios Superiores de Monterrey (2011). Estado de México hacia una entidad de conocimiento, el desarrollo tecnológico y la innovación, con ventajas comparativas y competitivas para las empresas, los negocios y el bienestar social. Estudio sectorial flores y hornicultura ornamental.
- Serrato Cuevas Rodolfo y Landeros Flores Verónica (2001). Instructivo para análisis de suelo. Propiedades Físicas. Universidad Autónoma del Estado de México
- Serrato Cuevas Rodolfo y Landeros Flores Verónica (2001). Instructivo para análisis de suelo. Propiedades Químicas. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Tecuapetla Vargas María Guadalupe (2014). Ecotoxicidad producida por plaguicidas empleados en el cultivo de gerbera jamesonii en invernadero, en Villa Guerrero, Estado de México.
- Thapinta, Anat;Hudak, Paul F. (2003). Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. Environment International, Volume 29, Issue 1, Pages 87-93, April 2003.
- U.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1995). Evaluación de riesgos en salud por la exposición a residuos peligrosos. Metepec, MX; 1995
- Varela, M. (1993). El medio físico, relaciones agua-aire-suelo: la zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas: teoría, medición y modelos. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 11-26.
- Vargas Castro José Alejandro (2006). El desarrollo local en el contexto de la globalización. Tres casos de estudio en el Estado de México. San Mateo Atenco, Valle de Bravo y Villa Guerrero. Jano S.A. de C.V.
- Velázquez Zepeda Aldo (2013). Determinación de áreas de cultivo florícola vulnerables a la migración de plaguicidas organofosforados y carbamicos usando un modelo de lixiviación. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma del Estado de México, 2013.

- Walkley, A. (1947). A critical examination of a rapid method for determining organic carbon in soil. Effect of variations in digestion conditions and inorganic soil constituents. *Soil Sci.* 63:251-263.
- WEISS, B., Amler, S. and Amler, R.W. Pesticides. *Pediatrics.* 113: 1030-1036.
- Wohlfahrt, J., Colin, F.; Assaghir, Z.; Bockstaller, C. (2010). Assessing the impact of the spatial arrangement of agricultural practices on pesticide runoff in small catchments: Combining hydrological modeling and supervised learning, *Ecological Indicators*, volume 10, pages 826-839, July, 2010.
- Xiang Guanggang, Li Diqu, Yuan Jianzhong, Guan Jingmin, Zhai Huifeng, Shi Mingan, Tao Liming (2013). Carbamate insecticide methomyl confers cytotoxicity through DNA damage induction. *Food and Chemical Toxicology*, Volumen 53, marzo 2013, páginas 352-358
- Xiaohe Song, Zhanao Deng, Li Gong, Jinguo Hu, Qing Ma. (2012). Cloning and characterization of resistance gene candidate sequences and molecular marker development in gerbera (*Gerbera hybrida*). *Scientia Horticulturae* 145 (2012) 68–75
- Yuzhou Luo, Minghua Zhang (2010). Spatially distributed pesticide exposure assessment in the Central Valley, California, USA, *Environmental Pollution*, volume 158, pages 1629-1637, May 2010.
- Z. Vryzas, G. Vassilioub, C. Alexoudisb, E. Papadopoulou-Mourkidou (2009). Spatial and temporal distribution of pesticide residues in surface waters in northeastern Greece. *Water Research*. Volumen 43, Pages 1-10 January 2009.
- Zhang, X. Zhang, M; Liu, X. (2008). Identification of hotspots for potential pyrethroid runoff: a GIS modeling study in San Joaquin River Watershed of California, USA, September 2008, volume 55, pages 1195-1206.



## **ANEXOS**

### **NORMAS MEXICANAS REFERENTES A PLAGUICIDAS**

- NOM-AA-105-1988. Plaguicida determinación de residuos en suelo- Método de toma de muestras.
- NOM-AA-105-1988. Plaguicida determinación de residuos en suelo- Método de toma de muestras.
- NOM-090-ECOL-1994, que establece los requisitos para el diseño y construcción de los receptores de agroquímicos.
- NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- NOM-044-SSA1-1993, que establece los requisitos para contener plaguicidas. Envase y embalaje.
- NOM-045-SSA1-1993, que establece el etiquetado de plaguicidas. Productos para uso agrícola, forestal, pecuario, de jardinería, urbano e industrial.
- NOM-046-SSA1-1993, que establece el etiquetado de plaguicidas. Productos para uso doméstico.
- Proyecto de NOM-058-SSA1-1993, por la que establecen los requisitos sanitarios para los establecimientos que fabrican y formulan plaguicidas y fertilizantes y que procesan sustancias tóxicas o peligrosas.
- Proyecto de NOM-043-SSA1-1993, relativa al almacenamiento de plaguicidas
- NOM-023-ZOO-1994, que establece el análisis de residuos de plaguicidas organoclorados y bifenilospoliclorados en grasa de bovinos, equinos, porcinos, ovinos y aves por cromatografía de gases.
- NOM-032-FITO-1995, que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarias para la realización de estudios de efectividad biológica de plaguicidas agrícolas y su dictamen técnico.
- NOM-033-FITO-1995, que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarias para el aviso de inicio de funcionamiento que deberán cumplir las personas físicas y morales interesadas en comercializar plaguicidas agrícolas.
- NOM-034-FITO-1995, que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarias para el aviso de inicio de funcionamiento que deberán cumplir las personas físicas y morales

- interesadas en la fabricación, formulación por maquila, formulación y/o maquila e importación de plaguicidas agrícolas.
- NOM-050-FITO-1995, que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarias para efectuar ensayos en campo para el establecimiento de límites máximos de residuos de plaguicidas en productos agrícolas.
- Proyecto de NOM-051-FITO-1995, que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarias para el manejo de plaguicidas agrícolas cuya adquisición y aplicación está sujeto a la recomendación escrita de un profesional fitosanitario.
- NOM-053-FITO-1995, que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarias para realizar la difusión de la publicidad de insumos fitosanitarios.
- NOM-057-FITO-1995, que establece los requisitos y especificaciones fitosanitarias para emitir el dictamen de análisis de residuos de plaguicidas.
- NOM-005-STPS-1993, relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias inflamables y combustibles.
- NOM-006-STPS-1993, relativa a las condiciones de seguridad e higiene para la estiba y desestiba de los materiales en los centros de trabajo.
- NOM-009-STPS-1993, relativa a las condiciones de seguridad e higiene para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias corrosivas, irritantes y tóxicas en los centros de trabajo.
- NOM-010-STPS-1993, relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral.
- NOM-002-SCT2-1994. Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados.
- NOM-003-SCT2-1994. Características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de materiales y residuos peligrosos.
- NOM-004-SCT2-1994. Sistema de identificación de unidades destinadas al transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos.
- NOM-005-SCT2-1994. Información de emergencia para el transporte terrestre de sustancias, materiales y residuos peligrosos.
- NOM-006-SCT2-1994. Aspectos básicos para la revisión ocular diaria de la unidad destinada al autotransporte de materiales y residuos peligrosos.

NOM-007-SCT2-1994. Marcado de envases y embalajes destinados al transporte de sustancias y residuos peligrosos.

NOM-010-SCT2-1994. Disposiciones de compatibilidad y segregación para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

NOM-011-SCT2-1994. Condiciones para el transporte de las sustancias, materiales y residuos peligrosos en cantidades limitadas.

NOM-019-SCT2-1994. Disposiciones generales para la limpieza y control de remanentes de sustancias y residuos peligrosos en las unidades que transportan materiales y residuos peligrosos.

NOM-028-SCT2-1994. Disposiciones especiales para los materiales y residuos peligrosos de la clase 3 líquidos inflamables transportados.

NOM-043-SCT2-1995. Documento de embarque de sustancias, materiales y residuos peligrosos.

NOM-232-SSA1-2009. Plaguicidas: que establece los requisitos del envase, embalaje y etiquetado de productos grado técnico y para uso agrícola, forestal, pecuario, jardinería, urbano, industrial y doméstico

NOM-021-SEMARNAT (2000). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestro y análisis.

#### CAPÍTULO IV - Prevención y Control de la Contaminación del Suelo

ARTÍCULO 134. Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:

IV. La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar sus efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar, y Fracción reformada DOF 13-12-1996

ARTÍCULO 135. Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:

- IV. El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

ARTÍCULO 143. Los plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, quedarán sujetos a las normas oficiales mexicanas que expidan en el ámbito de sus respectivas competencias, la Secretaría y las Secretarías de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, de Salud y de Comercio y Fomento Industrial. El Reglamento de esta Ley establecerá la regulación, que dentro del mismo marco de coordinación deba observarse en actividades relacionadas con dichos materiales, incluyendo la disposición final de sus residuos, empaques y envases vacíos, medidas para evitar efectos adversos en los ecosistemas y los procedimientos para el otorgamiento de las autorizaciones correspondientes.

ARTÍCULO 144. Atendiendo a lo dispuesto por la presente Ley, la Ley Federal de Sanidad Vegetal y las demás disposiciones legales y reglamentarias aplicables, la Secretaría coordinadamente con las Secretarías de Salud, de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y de Comercio y Fomento Industrial, participará en la determinación de restricciones arancelarias y no arancelarias relativas a la importación y exportación de materiales peligrosos.

No podrán otorgarse autorizaciones para la importación de plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, cuando su uso no esté permitido en el país en el que se hayan elaborado o fabricado.

ARTÍCULO 120.- Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local:

- V. La aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas;

## **LEGEPEGIR**

Artículo 31.- Estarán sujetos a un plan de manejo los siguientes residuos peligrosos y los productos usados, caducos, retirados del comercio o que se desechen y que estén clasificados como tales en la norma oficial mexicana correspondiente:

- IX. Plaguicidas y sus envases que contengan remanentes de los mismos;

Artículo 67.- En materia de residuos peligrosos, está prohibido:

- IX. La incineración de residuos peligrosos que sean o contengan compuestos orgánicos persistente y bioacumulables: plaguicidas organoclorados; así como bacterias y

acumuladores usados que contengan metales tóxicos; siempre y cuando exista en el país alguna otra tecnología disponible que cause menor impacto y riesgo ambiental.

## **LEY GENERAL DE SALUD**

ARTÍCULO 194. Para efectos de este Título, se entiende por control sanitario, el conjunto de acciones de orientación, educación, muestreo, verificación y en su caso, aplicación de medidas de seguridad y sanciones, que ejerce la Secretaría de Salud con la participación de los productores, comercializadores y consumidores, con base en lo que establecen las Normas Oficiales Mexicanas y otras disposiciones aplicables.

III. Proceso, uso, importación, exportación, aplicación y disposición final de plaguicidas, nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas para la salud, así como de las materias primas que intervengan en su elaboración.

ARTÍCULO 198. Únicamente requieren autorización sanitaria los establecimientos dedicados a:

III La aplicación de plaguicidas;

ARTÍCULO 204. Los medicamentos y otros insumos para la salud, los estupefacientes, sustancias psicotrópicas y productos que los contengan, así como los plaguicidas, nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas, para su venta o suministro deberán contar con autorización sanitaria, en los términos de esta Ley y demás disposiciones aplicables.

ARTÍCULO 207. Se considera contaminado el producto o materia prima que contenga microorganismos, hormonas, bacteriostáticos, plaguicidas, partículas radiactivas, materia extraña, así como cualquier otra sustancia en cantidades que rebasen los límites permisibles establecidos por la Secretaría de Salud.

ARTÍCULO 214. La Secretaría de Salud publicará en el Diario Oficial de la Federación las normas oficiales mexicanas que expida y, en caso necesario, las resoluciones sobre otorgamiento y revocación de autorizaciones sanitarias de medicamentos, estupefacientes, sustancias psicotrópicas y productos que los contengan, equipos médicos, plaguicidas,

nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas, así como de las materias primas que se utilicen en su elaboración.

ARTÍCULO 278. Para los efectos de esta Ley se entiende por:

I. Plaguicida: Cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se destina a controlar cualquier plaga, incluidos los vectores que transmiten las enfermedades humanas y de animales, las especies no deseadas que causen perjuicio o que interfieran con la producción agropecuaria y forestal, así como las sustancias defoliantes y las desecantes;

ARTÍCULO 279. Corresponde a la Secretaría de Salud:

II. Autorizar, en su caso, los productos que podrán contener una o más de las sustancias, plaguicidas o nutrientes vegetales, tomando en cuenta el empleo a que se destine el producto;

III. Autorizar los disolventes utilizados en los plaguicidas y nutrientes vegetales, así como los materiales empleados como vehículos, los cuales no deberán ser tóxicos por sí mismos ni incrementar la toxicidad del plaguicida o del nutriente vegetal;

IV. Autorizar el proceso de los plaguicidas persistentes y bioacumulables de cualquier composición química, solamente cuando no entrañen peligro para la salud humana y cuando no sea posible la sustitución adecuada de los mismos, y

V. Establecer, en coordinación con las dependencias competentes, las normas oficiales mexicanas en las que se especifiquen las condiciones que se deberán cumplir para fabricar, formular, envasar, etiquetar, embalar, almacenar, transportar, comercializar y aplicar plaguicidas, nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas en cualquier fase de su ciclo de vida. A efecto de proteger la salud de la población prevalecerá la opinión de la Secretaría de Salud.

ARTÍCULO 280. La Secretaría de Salud emitirá las normas oficiales mexicanas de protección para el proceso, uso y aplicación de los plaguicidas, nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas.

ARTÍCULO 281. Las etiquetas de los envases de los plaguicidas, nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas, en lo conducente, deberán ostentar, en español, claramente la Leyenda sobre los peligros que implica el manejo del producto, su forma de uso, sus antídotos en caso de intoxicación y el manejo de los envases que los contengan o

los hayan contenido, de conformidad con las disposiciones legales aplicables y con las normas que dicte la Secretaría de Salud.

ARTÍCULO 282 bis. Para los efectos de esta Ley, se consideran productos biotecnológicos, aquellos alimentos, ingredientes, aditivos, materias primas, insumos para la salud, plaguicidas, sustancias tóxicas o peligrosas, y sus desechos, en cuyo proceso intervengan organismos vivos o parte de ellos, modificados por técnica tradicional o ingeniería genética.

ARTÍCULO 298. Se requiere autorización sanitaria de la Secretaría de Salud para la importación de los plaguicidas, nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas que constituyan un riesgo para la salud.

ARTÍCULO 376. Requieren registro sanitario los medicamentos, estupefacientes, sustancias psicotrópicas y productos que los contengan; equipos médicos, prótesis, órtesis, ayudas funcionales, agentes de diagnóstico, insumos de uso odontológico, materiales quirúrgicos, de curación y productos higiénicos, estos últimos en los términos de la fracción VI del artículo 262 de esta Ley, así como los plaguicidas, nutrientes vegetales y sustancias tóxicas o peligrosas.

Características de las capas de suelo								
Fecha	Capa 1				Capa 2			
	Temperatura			Densidad del agua	Temperatura			Densidad del agua
	°C		°K		°C		°K	
23/08/2015	18.121	18	291.271	0.99862	18.778	19	291.928	0.99843
24/08/2015	22.325	22	295.475	0.9978	18.450	18	291.600	0.99862
25/08/2015	20.973	21	294.123	0.99802	18.817	19	291.967	0.99843
26/08/2015	20.811	21	293.961	0.99802	19.145	19	292.295	0.99843
27/08/2015	21.255	21	294.405	0.99802	19.022	19	292.172	0.99843
28/08/2015	19.212	19	292.362	0.99843	19.088	19	292.238	0.99843
29/08/2015	20.638	21	293.788	0.99802	19.337	19	292.487	0.99843
30/08/2015	19.629	20	292.779	0.99823	18.874	19	292.024	0.99843
31/08/2015	21.602	22	294.752	0.9978	18.981	19	292.131	0.99843
01/09/2015	22.003	22	295.153	0.9978	18.856	19	292.006	0.99843
02/09/2015	20.073	20	293.223	0.99823	19.187	19	292.337	0.99843
03/09/2015	19.799	20	292.949	0.99823	19.127	19	292.277	0.99843
04/09/2015	21.091	21	294.241	0.99802	18.630	19	291.780	0.99843
05/09/2015	21.185	21	294.335	0.99802	18.295	18	291.445	0.99862
06/09/2015	22.747	23	295.897	0.99756	17.984	18	291.134	0.99862
07/09/2015	23.117	23	296.267	0.99756	18.116	18	291.266	0.99862
08/09/2015	21.992	22	295.142	0.9978	18.306	18	291.456	0.99862
09/09/2015	21.759	22	294.909	0.9978	17.660	18	290.810	0.99862
10/09/2015	21.626	22	294.776	0.9978	17.613	18	290.763	0.99862
11/09/2015	22.063	22	295.213	0.9978	18.377	18	291.527	0.99862
12/09/2015	21.966	22	295.116	0.9978	18.651	19	291.801	0.99843



Características de las capas de suelo								
Fecha	Capa 1				Capa 2			
	Temperatura			Densidad del agua	Temperatura			Densidad del agua
	°C		°K		°C		°K	
13/09/2015	20.326	20	293.476	0.99823	18.503	19	291.819	0.99843
14/09/2015	19.744	20	292.894	0.99823	18.074	19	291.653	0.99843
15/09/2015	20.832	21	293.982	0.99802	17.633	18	291.224	0.99862
16/09/2015	18.904	19	292.054	0.99843	17.892	18	290.783	0.99862
17/09/2015	19.125	19	292.275	0.99843	17.919	18	291.042	0.99862
18/09/2015	21.580	22	294.730	0.9978	18.283	18	291.069	0.99862
19/09/2015	22.038	22	295.188	0.9978	18.688	18	291.433	0.99862
20/09/2015	21.031	21	294.181	0.99802	18.663	19	291.838	0.99843
21/09/2015	19.678	20	292.828	0.99823	18.160	19	291.813	0.99843
22/09/2015	21.487	21	294.637	0.99802	18.068	18	291.310	0.99862
23/09/2015	21.431	21	294.581	0.99802	18.173	18	291.218	0.99862
24/09/2015	21.107	21	294.257	0.99802	18.147	18	291.323	0.99862
25/09/2015	17.812	18	290.962	0.99862	18.134	18	291.297	0.99862
26/09/2015	17.295	17	290.445	0.9988	18.084	18	291.284	0.99862
27/09/2015	18.378	18	291.528	0.99862	17.757	18	291.234	0.99862
28/09/2015	15.607	16	288.757	0.99897	17.658	18	290.907	0.99862
29/09/2015	15.713	16	288.863	0.99897	17.470	18	290.808	0.99862
30/09/2015	17.277	17	290.427	0.9988	17.176	17	290.620	0.9988
01/10/2015	18.625	18	291.775	0.99862	18.503	17	290.326	0.9988

Características de las capas de suelo								
Fecha	Capa 3			Capa 4				
	Temperatura		Densidad del agua	Temperatura			Densidad del agua	
	°C		°K		°C		°K	
23/08/2015	18.778	19	291.928	0.99843	19.392	19	292.542	0.99843
24/08/2015	18.450	18	291.600	0.99862	19.283	19	292.433	0.99843
25/08/2015	18.817	19	291.967	0.99843	19.172	19	292.322	0.99843
26/08/2015	19.145	19	292.295	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
27/08/2015	19.022	19	292.172	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
28/08/2015	19.088	19	292.238	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
29/08/2015	19.337	19	292.487	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
30/08/2015	18.874	19	292.024	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
31/08/2015	18.981	19	292.131	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
01/09/2015	18.856	19	292.006	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
02/09/2015	19.187	19	292.337	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
03/09/2015	19.127	19	292.277	0.99843	19.099	19	292.249	0.99843
04/09/2015	18.630	19	291.780	0.99843	19.100	19	292.250	0.99843
05/09/2015	18.295	18	291.445	0.99862	19.018	19	292.168	0.99843
06/09/2015	17.984	18	291.134	0.99862	18.949	19	292.099	0.99843
07/09/2015	18.116	18	291.266	0.99862	18.847	19	291.997	0.99843
08/09/2015	18.306	18	291.456	0.99862	18.785	19	291.935	0.99843
09/09/2015	17.660	18	290.810	0.99862	18.728	19	291.878	0.99843
10/09/2015	17.613	18	290.763	0.99862	18.660	19	291.810	0.99843
11/09/2015	18.377	18	291.527	0.99862	18.551	19	291.701	0.99843
12/09/2015	18.651	19	291.801	0.99843	18.572	19	291.722	0.99843

Características de las capas de suelo								
Fecha	Capa 3				Capa 4			
	Temperatura			Densidad del agua	Temperatura			Densidad del agua
	°C		°K		°C		°K	
13/09/2015	18.669	19	291.819	0.99843	18.626	19	291.776	0.99843
14/09/2015	18.503	19	291.653	0.99843	18.622	19	291.772	0.99843
15/09/2015	18.074	18	291.224	0.99862	18.612	19	291.762	0.99843
16/09/2015	17.633	18	290.783	0.99862	18.614	19	291.764	0.99843
17/09/2015	17.892	18	291.042	0.99862	18.531	19	291.681	0.99843
18/09/2015	17.919	18	291.069	0.99862	18.515	19	291.665	0.99843
19/09/2015	18.283	18	291.433	0.99862	18.438	18	291.588	0.99862
20/09/2015	18.688	19	291.838	0.99843	18.471	18	291.621	0.99862
21/09/2015	18.663	19	291.813	0.99843	18.535	19	291.685	0.99843
22/09/2015	18.160	18	291.310	0.99862	18.543	19	291.693	0.99843
23/09/2015	18.068	18	291.218	0.99862	18.527	19	291.677	0.99843
24/09/2015	18.173	18	291.323	0.99862	18.528	19	291.678	0.99843
25/09/2015	18.147	18	291.297	0.99862	18.527	19	291.677	0.99843
26/09/2015	18.134	18	291.284	0.99862	18.521	19	291.671	0.99843
27/09/2015	18.084	18	291.234	0.99862	18.438	18	291.588	0.99862
28/09/2015	17.757	18	290.907	0.99862	18.440	18	291.590	0.99862
29/09/2015	17.658	18	290.808	0.99862	18.429	18	291.579	0.99862
30/09/2015	17.470	17	290.620	0.9988	18.342	18	291.492	0.99862
01/10/2015	17.176	18	290.326	0.99868484	18.298	18	291.448	0.99862

**Características de las capas de suelo**

Fecha	Capa 5									
	Temperatura			Densidad del agua	Temperatura	Densidad del agua			Temperatura	
	°C		°K			°C		°K		
23/08/2015	19.392	19	292.542	0.99843	13/09/2015	18.626	19	291.776	0.99843	
24/08/2015	19.283	19	292.433	0.99843	14/09/2015	18.622	19	291.772	0.99843	
25/08/2015	19.172	19	292.322	0.99843	15/09/2015	18.612	19	291.762	0.99843	
26/08/2015	19.100	19	292.250	0.99843	16/09/2015	18.614	19	291.764	0.99843	
27/08/2015	19.100	19	292.250	0.99843	17/09/2015	18.531	19	291.681	0.99843	
28/08/2015	19.100	19	292.250	0.99843	18/09/2015	18.515	19	291.665	0.99843	
29/08/2015	19.100	19	292.250	0.99843	19/09/2015	18.438	18	291.588	0.99862	
30/08/2015	19.100	19	292.250	0.99843	20/09/2015	18.471	18	291.621	0.99862	
31/08/2015	19.100	19	292.250	0.99843	21/09/2015	18.535	19	291.685	0.99843	
01/09/2015	19.100	19	292.250	0.99843	22/09/2015	18.543	19	291.693	0.99843	
02/09/2015	19.100	19	292.250	0.99843	23/09/2015	18.527	19	291.677	0.99843	
03/09/2015	19.099	19	292.249	0.99843	24/09/2015	18.528	19	291.678	0.99843	
04/09/2015	19.100	19	292.250	0.99843	25/09/2015	18.527	19	291.677	0.99843	
05/09/2015	19.018	19	292.168	0.99843	26/09/2015	18.521	19	291.671	0.99843	
06/09/2015	18.949	19	292.099	0.99843	27/09/2015	18.438	18	291.588	0.99862	
07/09/2015	18.847	19	291.997	0.99843	28/09/2015	18.440	18	291.590	0.99862	
08/09/2015	18.785	19	291.935	0.99843	29/09/2015	18.429	18	291.579	0.99862	
09/09/2015	18.728	19	291.878	0.99843	30/09/2015	18.342	18	291.492	0.99862	
10/09/2015	18.660	19	291.810	0.99843	01/10/2015	18.298	18	291.448	0.99862	
11/09/2015	18.551	19	291.701	0.99843						
12/09/2015	18.572	19	291.722	0.99843						

