



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

**SISTEMA EXPERTO PARA EL CONTROL DE PLAGAS Y  
ENFERMEDADES EN HORTALIZAS Y FRUTAS EN EL  
ESTADO DE MICHOACAN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(COMPUTACIÓN)**

P R E S E N T A:

**CARLOS ALBERTO ROSSEL JAHUIRA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. NICOLAS KEMPER VALVERDE**

México, D.F.

2007.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

*A mi familia  
por ser uno de mis principales motivos  
para seguir adelante*

*4PG,CS&Ame*



# *Agradecimientos*

*A Dios, V&L por todas las cosas buenas que me están dando.*

*A mi familia por su apoyo permanente e incondicional durante estos casi 3 años de mi estancia en México.*

*Al Dr. Nicolas Kemper por su apoyo, orientación y tiempo dedicado durante mis estudios de maestría y durante el desarrollo de este trabajo.*

*A los profesores que dedicaron su tiempo a la revisión de este trabajo, mis sinodales: Dra. Ana Lilia Laureano Cruces, Dr. Christian Lemaitre León, Dr. Felipe Lara Rosano y Dr. Sergio Marcellin Jaques. Les agradezco todos sus comentarios y aportaciones realizadas.*

*A todos los profesores del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación que me brindaron su apoyo y compartieron sus valiosos conocimientos durante la realización de mis estudios en la UNAM.*

*A todo el equipo de la Fundación Produce – Michoacán que colaboró en el desarrollo del proyecto que dio origen a este trabajo.*

*A los amigos que estuvieron “presentes cuando debían estarlo”. En especial a aquellos que con sus consejos, opiniones y sugerencias me están ayudando a seguir “el camino”.*

*AnMqt!*

*Muchas gracias!!!*

*Carlos Rossel*

# INDICE

---

<b>Lista de Figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIV</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Sistemas Expertos aplicados en agricultura	1
1.2 Importancia de la producción de frutas y hortalizas en México	2
1.3 La agricultura del Estado de Michoacán	4
1.4 Definición del problema	5
1.5 Objetivo	6
1.6 Sobre la arquitectura del Sistema Experto desarrollado	6
1.7 Organización del trabajo	7
<b>Capítulo 2 Conceptos fundamentales sobre manejo de cultivos</b>	<b>9</b>
2.1 Fenología agrícola	9
2.2 Estimación de la fenología	9
2.3 Plagas	10
2.4 Desarrollo de los insectos	11
2.5 Muestreos	12
2.5.1 Distribución espacial	13
2.5.2 Técnicas y herramientas de muestreo	14
2.5.2.1 Monitoreo mediante trampas amarillas pegajosas	14
2.5.2.2 Muestreo mediante charolas	15
2.5.2.3 Muestreo mediante inspección de hojas	16
2.5.2.4 Las trampas de cubeta	16
2.5.2.5 Muestreo mediante aspiradores	16
2.5.2.6 Muestreo visual	17

2.6	Enfermedades	17
2.6.1	Enfermedades causadas por hongos	17
2.6.2	Enfermedades causadas por bacterias	18
2.6.3	Enfermedades causadas por virus	19
2.7	Control de plagas y enfermedades	20
2.7.1	Control químico de plagas y enfermedades	21
2.7.2	Control cultural de plagas y enfermedades	23
2.7.3	Control biológico de plagas y enfermedades	23
2.7.4	Agentes de control biológico	24
2.7.4.1	Depredadores	24
2.7.4.2	Parasitoides	25
2.7.5	Agentes de control microbial (insecticidas biológicos)	25
2.7.5.1	Bacterias entomopatógenas	26
2.7.5.2	Virus baculovirus entomopatógenos	26
2.7.5.3	Nemátodos entomopatógenos	27
2.7.6	Insecticidas de origen vegetal	27
2.7.6.1	Piretrinas	27
2.7.6.2	Tetra-nor-tri-terpenoides	28
2.7.6.3	Alcaloides	29
2.8	Consideraciones del dominio del problema	29
<b>Capítulo 3    Sistemas Expertos</b>		<b>30</b>
3.1	Definición	30
3.2	Razonamiento	30
3.2.1	Razonamiento deductivo	30
3.2.2	Razonamiento inductivo	30
3.2.3	Razonamiento abductivo	31
3.2.4	Razonamiento analógico	31
3.2.5	Razonamiento de sentido común	31
3.3	Estructura de un Sistema Experto	32
3.3.1	Base de conocimiento	32
3.3.1.1	Reglas	32
3.3.1.2	Redes semánticas	33
3.3.1.3	Frames	34

3.3.2	Memoria de trabajo	35
3.3.3	Motor de inferencia	35
3.3.4	Interfaz de usuario	38
3.3.5	Módulo de explicación	38
3.4	Construcción de un Sistema Experto	39
3.5	El Ingeniero del Conocimiento	39
3.6	Tipos de Sistemas Expertos	40
3.6.1	Sistemas Expertos para la predicción	40
3.6.2	Sistemas Expertos para el diagnóstico	41
3.6.3	Sistemas Expertos para el diseño	42
3.6.4	Sistemas Expertos para la planificación	42
3.6.5	Sistemas Expertos para el monitoreo	43
3.6.6	Sistemas Expertos para la reparación	43
3.6.7	Sistemas Expertos para el control	43
3.7	Metodología para el desarrollo de un Sistema Experto	44
3.7.1	Evaluación del problema	45
3.7.2	Adquisición del conocimiento	45
3.7.3	Diseño del sistema	46
3.7.3.1	Técnicas de representación del conocimiento	47
3.7.3.2	Mapas de conocimiento	47
3.7.3.3	Técnicas de control	49
3.7.3.4	Software para desarrollar un Sistema Experto	49
3.7.3.5	Desarrollo del prototipo	50
3.7.3.6	Desarrollo de la interfaz	50
3.7.3.7	Desarrollo del producto	51
3.7.4	Pruebas y evaluación	51
3.7.4.1	Validación del sistema	52
3.7.4.2	Validación del razonamiento	53
3.7.5	Documentación	53
3.7.5.1	Guía para diseñar la documentación	53
3.7.6	Mantenimiento	54

<b>Capítulo 4</b>	<b>Sistema Experto para el Control de Plagas y Enfermedades</b>	<b>56</b>
4.1	Conceptualización del Sistema Experto	56
4.2	Adquisición de conocimiento para el desarrollo del Sistema Experto	57
4.3	Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades	59
4.3.1	Adquisición de Conocimiento para la Estimación de la Fenología del Cultivo	60
4.3.2	Diseño de la Estimación de la Fenología del Cultivo	61
4.3.3	Adquisición de Conocimiento para la Evaluación del Clima	63
4.3.4	Diseño de la Evaluación del Clima	63
4.3.5	Adquisición de Conocimiento para el Monitoreo Preventivo de Enfermedades	64
4.3.6	Diseño del Monitoreo Preventivo de Enfermedades	65
4.3.7	Adquisición de Conocimiento para el Control Preventivo de Enfermedades	66
4.3.8	Diseño del Control Preventivo de Enfermedades	66
4.4	Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades	67
4.4.1	Adquisición de Conocimiento para el Diagnóstico de Enfermedad	69
4.4.2	Diseño de Diagnóstico de Enfermedad	69
4.4.3	Adquisición de Conocimiento para el Control de Enfermedades	73
4.4.4	Diseño del Control de Enfermedades	74
4.5	Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas	75
4.5.1	Adquisición de Conocimiento para Evaluar Presencia de Plagas Vectores	77
4.5.2	Diseño de la Evaluación de Presencia de Plagas Vectores	77
4.5.3	Adquisición de Conocimiento para el Diagnóstico de Plaga Vector	78
4.5.4	Diseño del Diagnóstico de Plaga Vector	79
4.5.5	Adquisición de Conocimiento para el Control de Plagas Vectores	83
4.5.6	Diseño del Control de Plagas Vectores	84
4.5.7	Adquisición de Conocimiento para el Diagnóstico de Plaga No Vector	86
4.5.8	Diseño del Diagnóstico de Plaga No Vector	86
4.5.9	Adquisición de Conocimiento para el Control de Plagas No Vectores	86
4.5.10	Diseño del Control de Plagas No Vectores	87
4.6	Representación y Técnica de Control del Conocimiento	89
4.7	Modelos de Interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos	91

4.7.1	Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades	91
4.7.2	Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades	92
4.7.3	Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas	93
4.8	Validación de reglas	94
4.9	Validación de interfaz de usuario	95
4.9.1	Primer prototipo	95
4.9.2	Segundo prototipo	96
4.9.3	Tercer prototipo	96
<b>Capítulo 5 Resultados</b>		<b>97</b>
5.1	Sobre la implementación del Sistema Experto	97
5.2	Descripción de la Interfaz de Usuario del Sistema Experto	99
5.2.1	Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades	99
5.2.2	Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades	100
5.2.3	Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas	103
5.2.4	Módulo de Explicación: Visualizador de Reglas	107
5.2.4.1	Visualizador de Reglas del Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades	107
5.2.4.2	Visualizador de Reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades	108
5.2.4.3	Visualizador de Reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas	108
5.3	Validación del Sistema Experto basada en históricos	109
<b>Capítulo 6 Conclusiones, Principales Contribuciones y Trabajos Futuros</b>		<b>111</b>
6.1	Conclusiones	111
6.2	Principales Contribuciones	112
6.3	Trabajos Futuros	112
<b>Referencias Bibliográficas</b>		<b>113</b>
<b>Glosario</b>		<b>117</b>

## Lista de Figuras

---

1.1	Distribución de la producción total de jitomate en México durante 1991-2000.	4
1.2	Distribución de la producción total de aguacate a nivel nacional en el 2005.	5
2.1	Desarrollo con metamorfosis simple.	12
2.2	Desarrollo con metamorfosis completa.	12
2.3	Trampas amarillas en un cultivo de jitomate.	15
2.4	Preparación de la charola.	15
2.5	Realización del muestreo con charolas.	15
2.6	Realización del muestreo en campo.	16
3.1	Arquitectura de un SE.	32
3.2	Ejemplo de red semántica.	33
3.3	Estructura general de un frame.	34
3.4	Frame Carro.	34
3.5	Frame Audi TT Coupe.	35
3.6	Funcionamiento de un SE con encadenamiento hacia adelante.	36
3.7	Funcionamiento de un SE con encadenamiento hacia atrás.	37
3.8	Fases para el desarrollo de un SE.	44
3.9	Esquema de un diagrama de dependencia.	47
3.10	Diagrama de dependencia para la Estimación de Fenología de un cultivo.	48
4.1	Arquitectura del SE desarrollado para Michoacán.	57
4.2	Mapa de dependencia para el Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.	60
4.3	Mapa de dependencia para el Diagnóstico y Control de Enfermedades.	68
4.4	Mapa de dependencia para el Diagnóstico y Control de Plagas Vectores.	76
4.5	Mapa de dependencia para el Diagnóstico y Control de Plagas No Vectores.	85
4.6	Modelo de interacción de Base de Conocimientos - Base de Datos.	90
4.7	Modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.	91
4.8	Modelo de interacción Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades.	92
4.9	Modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (vectores).	93
4.10	Modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (no vectores).	94

5.1	Emisión de una alerta.	100
5.2	Interfaz de captura de síntomas encontrados en tallos.	101
5.3	Interfaz de captura de síntomas encontrados en hojas.	102
5.4	Interfaz de captura de síntomas encontrados en frutos.	102
5.5	Interfaz para mostrar resultados del diagnóstico y su respectiva recomendación.	103
5.6	Interfaz de captura de síntomas de plaga en raíces y tallos, así como para describir el aspecto de las plantas.	104
5.7	Interfaz de captura de síntomas de plaga en hojas, flores y frutos.	105
5.8	Interfaz de captura de resultados del muestreo poblacional de plagas.	105
5.9	Interfaz de captura de virosis externa.	106
5.10	Interfaz para mostrar resultados del diagnóstico de plagas (vectores y no vectores) y su respectiva recomendación.	106
5.11	Visualizador de reglas del Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.	107
5.12	Visualizador de reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades.	108
5.13	Visualizador de reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (Vectores).	109
5.14	Visualizador de reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (No Vectores).	109

## Lista de Tablas

---

1.1	Diez mayores productores mundiales de jitomate.	3
1.2	Diez mayores productores mundiales de aguacate.	3
2.1	Principales plagas que atacan a los cultivos de jitomate y aguacate en Michoacán.	11
2.2	Principales enfermedades que atacan a los cultivos de jitomate y aguacate en Michoacán.	20
3.1	Tabla para recolectar información correspondiente al diagrama de dependencia mostrado en la figura 3.10.	48
4.1	Formato de registro de duración, en días y unidades calor, de las etapas fenológicas de un cultivo.	61
4.2	Formato de registro de duración, en días y unidades calor, de las etapas fenológicas del jitomate.	62
4.3	Formato de registro de condiciones climáticas favorables para el desarrollo de enfermedades de un cultivo.	63
4.4	Condiciones climáticas favorables para el desarrollo de enfermedades del jitomate.	64
4.5	Formato de registro de variables evaluadas durante el Monitoreo Preventivo de Enfermedades.	65
4.6	Condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades del jitomate.	65
4.7	Formato de registro de recomendaciones de control preventivo de enfermedades de un cultivo.	66
4.8	Recomendación de control preventivo contra Tizón Tardío.	67
4.9	Formato de registro de síntomas para cada enfermedad según la parte de la planta donde se presenta el síntoma.	69
4.10	Formato de registro de único de síntomas de enfermedades para cada cultivo.	70
4.11	Matriz de correspondencia Síntomas/Enfermedades para cada cultivo.	70
4.12	Matriz de correspondencia Síntomas/Etapa Fenológica para diagnosticar enfermedades de un cultivo.	70
4.13	Registro único de síntomas de enfermedades del jitomate.	71
4.14	Matriz de correspondencia Síntomas/Enfermedades para el jitomate.	72
4.15	Matriz de correspondencia Síntomas/Etapa Fenológica para diagnosticar algunas enfermedades del jitomate.	72
4.16	Formato para registrar recomendaciones para enfermedades de cultivos.	73
4.17	Registro de recomendaciones para Tizón Tardío en cultivos de jitomate.	74

4.18	Formato de registro de rangos moderados y críticos para evaluar la presencia de plagas vectores.	77
4.19	Rangos moderados y críticos para evaluar la presencia de plagas vectores en jitomate.	78
4.20	Formato de registro de síntomas de plagas según la parte de la planta donde se presenta el síntoma.	79
4.21	Formato de registro de único de síntomas de plagas para cada cultivo.	79
4.22	Matriz de correspondencia Síntomas/Plagas para cada cultivo.	80
4.23	Matriz de correspondencia Síntomas/Etapa Fenológica para diagnosticar la virosis causada por una plaga vector.	80
4.24	Registro único de síntomas de plagas, vectores y no vectores, del jitomate.	81
4.25	Matriz de correspondencia Síntoma/Plaga para Mosca Blanca y Trips.	82
4.26	Matriz de correspondencia Síntoma/Etapa Fenológica para diagnosticar virosis de Mosca Blanca y Trips.	82
4.27	Formato para registrar recomendaciones para plagas vectores de cultivos.	83
4.28	Recomendaciones para Trips adultos (plaga vector) en cultivos de jitomate.	84
4.29	Formato para registrar recomendaciones para plagas no vectores de cultivos.	87
4.30	Matriz de correspondencia Síntoma/Plaga para Minador de la Hoja y Trozador.	87
4.31	Matriz de correspondencia Síntoma/Etapa Fenológica para diagnosticar Minador de la Hoja y Trozador.	87
4.32	Recomendaciones para Trozador y Gallina Ciega, plagas no vectores del jitomate.	88
5.1	Reglas del SE construido para el jitomate.	99

## **RESUMEN**

El presente trabajo consiste en un Sistema Experto (SE) diseñado para apoyar al productor en tareas primordiales dentro del manejo del cultivo como son: monitoreo y control preventivo de enfermedades, diagnóstico y control de plagas y enfermedades en el estado de Michoacán, México y se realizó bajo el auspicio de Fundación Produce Michoacán, formando parte del proyecto N° SIS0601 “Red de Inteligencia Artificial para el Monitoreo, Control y Predicción de Plagas y Enfermedades en Frutas y Hortalizas en Michoacán”.

La metodología empleada está basada en la combinación de metodologías establecidas para el desarrollo de SE y el conocimiento generado en el Laboratorio de Sistemas Inteligentes del CCADET, UNAM.

Los usuarios finales, productores del Estado de Michoacán, fueron miembros activos del equipo de trabajo a lo largo del desarrollo del SE, dado que la aceptación de los usuarios es un factor clave en el éxito de proyectos de SE.

El diseño del SE contempla el empleo de reglas para representar el conocimiento, como estrategia de manejo de este conocimiento se empleó el encadenamiento hacia adelante. Asimismo se implementó un modelo de interacción de base de datos-base de conocimiento, el cual busca facilitar las tareas de mantenimiento del SE al permitir que la base de conocimiento alimente sus reglas con datos guardados en una base de datos relacional. Cabe mencionar que se implementó visualizadores de reglas, los cuales permiten ver en tiempo de ejecución como se van disparando las distintas reglas mientras el SE está en ejecución.

Finalmente, tras la evaluación del SE, el cual obtuvo resultados iguales o similares a los dados por expertos, se procedió a seleccionar a algunos productores para que el SE sea implementado en sus cultivos como parte de una prueba piloto, próxima a realizarse al momento de la redacción del presente trabajo.

## ABSTRACT

In this work, we present an Expert System designed to support to the farmer in fundamental tasks within the handling of crops like: monitoring and preventive control of diseases, diagnosis and control of plagues and diseases in the State of Michoacan, Mexico. It was sponsored by the Foundation PRODUCE-Michoacan, being part of the project called "Artificial Intelligence Network for Monitoring, Controlling and Predicting of development of Plagues and Diseases in Fruits and Vegetables in Michoacan".

The methodology that was used is based on the combination of methodologies established for the development of Expert Systems and in knowledge generated in the Laboratory of Intelligent Systems, CCADET, UNAM.

Since the acceptance of the users is a key factor in the success of projects of Expert Systems; end users, farmers of the State of Michoacan, were active members of work team during the development of the Expert System.

In the design of Expert System, rules were used to represent the knowledge; as strategy of handling of this knowledge, forward chaining was used. Also, an interaction model between a knowledge base and data base was implemented, which facilitates the tasks of maintenance of the Expert System, allowing that the knowledge base feeds its rules with data stored in a relational database. It is important to mention that visual environments, which show how rules are fired in execution time, were developed.

Finally, after the evaluation of Expert System, which obtained results equal or similar to the solutions by experts, some farmers were selected for deploying the Expert System in their crops as a pilot test at the time of the writing of the present work.

### Introducción

#### 1.1 Sistemas Expertos aplicados en agricultura

El desarrollo de los Sistemas Expertos (SE) y sus continuos avances han permitido su expansión y aplicación en diversas áreas del conocimiento y tecnología. En el campo del diagnóstico de enfermedades en plantas se han propuesto una serie de trabajos [1], [2]. De igual manera, se han desarrollado una serie de modelos relacionados con el control de plagas desde inicios de los años ochentas. Entre ellos podemos mencionar:

- AMRAPALIKA [3] es un sistema experto para diagnosticar plagas y enfermedades en cultivos de mango en La India. Para su desarrollo se empleó el shell ESTA, el cual está escrito en el lenguaje Visual Prolog. El sistema experto se caracteriza por presentar los síntomas al usuario y brinda la opción de mostrar imágenes de los síntomas para ayudar al usuario a responder las preguntas que le va presentando. La representación del conocimiento se hizo mediante reglas y se empleó el encadenamiento hacia atrás.
- CPEST [4] es un sistema experto para control de plagas y enfermedades en el café jamaicano. Este sistema fue desarrollado en wxCLIPS, que es una extensión del CLIPS la cual permite incorporar interfaces gráficas de usuario. Para representar el conocimiento se empleó reglas con encadenamiento hacia adelante.
- En Italia, un sistema experto para el manejo integrado de plagas en manzanas (POMI) [5]. POMI se enfoca en la fase preliminar del complejo proceso del control integrado de huertos de manzanas, denominado detección de poblaciones de insectos en el campo y su estimación de dimensión. El sistema consiste de 2 partes: clasificación de los hallazgos de los usuarios y una explicación de los mismos empleando razonamiento abductivo
- CUPTEX [6] es un sistema experto que ha sido desarrollado para manejar las enfermedades de los pepinos. Su principal objetivo es identificar la causa de la observación anormal y

proponer un remedio adecuado. Sin embargo, el usuario opcionalmente puede consultar directamente la medicación si ya conoce la causa del problema. En este caso, el sistema comienza confirmando estas causas antes de dar la medicación recomendada.

- NEPER [7] fue desarrollado para manejar los aspectos de manejo de producción en cultivos de trigo. Este sistema incluye la selección de variedad, planeación de las fechas de las actividades a realizar en el campo, requerimientos de irrigación y fertilización, identificación de enfermedades e insectos, control de insectos y enfermedades, y manejo de cosecha. La metodología empleada por este sistema es la de Tarea Genérica [8].
- Yialouris y Sideridis [9] desarrollaron un sistema experto para la identificación de enfermedades del tomate. Para representar la base de conocimiento se utilizó el esquema de representación de conocimiento por frame.

Como se puede desprender de los trabajos citados previamente, la tecnología de los Sistemas Expertos ha servido para resolver diversos problemas que se presentan en el dominio de los cultivos agrícolas, contribuyendo a mejorar la calidad de los productos e incrementar la eficiencia del sistema de producción agrícola.

## **1.2 Importancia de la producción de frutas y hortalizas en México**

La producción de frutas y hortalizas se ha convertido desde la década de los sesenta en una alternativa agrícola importante para una buena parte de las regiones rurales de México. Si bien es cierto, el cultivo de dichos productos es más riesgoso que el de granos básicos (fríjol, trigo, arroz, etc.) o cultivos forrajeros (alfalfa, maíz forrajero, etc.), también es cierto que aquellos productos son mucho más rentables. Este hecho, el crecimiento del mercado interno y la integración de este tipo de agricultura al mercado de Estados Unidos han ocasionado que varios estados de México se aboquen a impulsar el cultivo de frutas y hortalizas.

Dentro del cultivo de hortalizas, el jitomate es la principal hortaliza cultivada en México. La producción de jitomate se inició masivamente en la década de los sesentas, basta decir que entre 1964 y 1999 la producción se incrementó en 446%. En 1995, comprendió el 31% del total de hortalizas producidas con una clara tendencia al crecimiento derivado de la entrada en vigor del

Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). En la actualidad México se ubica en el puesto 10 en la clasificación mundial de países productores de jitomate, ver tabla 1.1

**Tabla 1.1** Diez mayores productores mundiales de jitomate.

Clasificación.	País productor	Producción (T)
1	China	31.644.040
2	Estados Unidos de América	12.766.000
3	Turquía	9.700.000
4	Italia	7.814.899
5	India	7.600.000
6	Egipto	7.600.000
7	España	4.473.573
8	Irán	4.200.000
9	Brasil	3.303.530
10	México	2.148.130

**Fuente:** www.fao.org

Respecto a la producción de frutas, tenemos que el aguacate es el producto líder por excelencia, que ha permitido ubicar a México como el primer productor a nivel mundial, ver tabla 1.2

**Tabla 1.2** Diez mayores productores mundiales de aguacate.

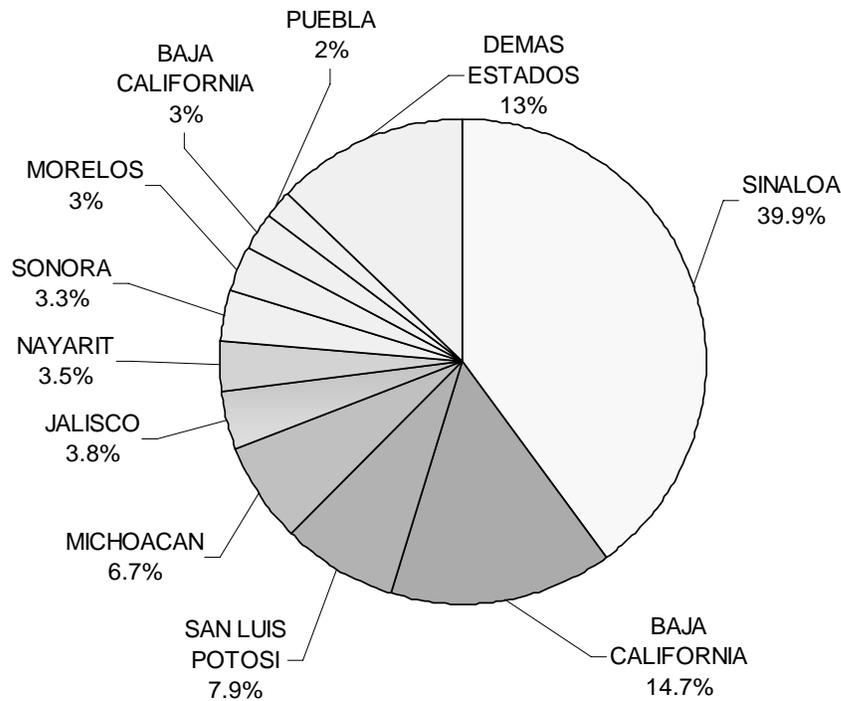
Clasificación	País productor	Producción (T)
1	México	1.040.390
2	Indonesia	263.575
3	Estados Unidos de América	214.000
4	Colombia	185.811
5	Brasil	175.000
6	Chile	163.000
7	Dominicana, República	140.000
8	Perú	102.000
9	China	85.000
10	Etiopía	81.500

**Fuente:** www.fao.org

### 1.3 La agricultura del Estado de Michoacán

Actualmente, el estado de Michoacán se ubica entre los 4 primeros lugares a nivel nacional en el valor de la producción agrícola, junto a Jalisco, Sinaloa y Veracruz [10]. Durante el periodo de 1997 al 2004 llegó a ocupar los siguientes lugares: Primero en 1999, segundo en 1997 y 2003, tercero en 2001 y 2004, y cuarto en 1998 y 2004.

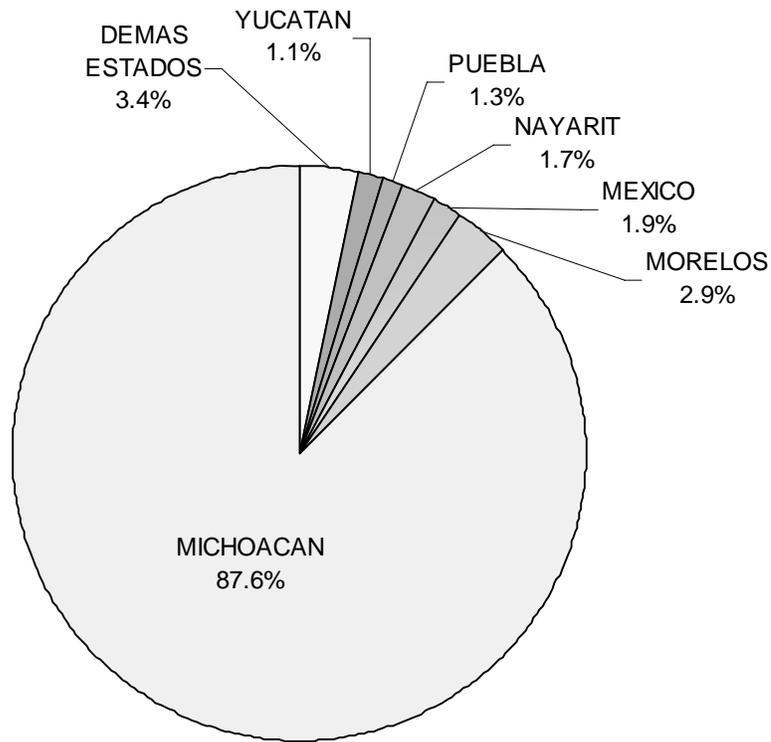
Respecto a jitomate, las cifras del Servicio de Información Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) indican que la producción total mexicana de este producto fue de 19 millones de toneladas ente 1991 y 2000, concentrándose el 70% de la producción en: Sinaloa (39.9%), Baja California (14.7%), San Luis Potosí (7.9%) y Michoacán (6.7%).



**Figura 1.1** Distribución de la producción total de jitomate en México durante 1991-2000

Sin bien es cierto, en Sinaloa y Baja California se concentra gran parte de la producción de jitomate, cabe mencionar que casi toda esta producción está destinada a la exportación, teniendo como principal destino a Estados Unidos. Quedando la producción del resto de estados para el mercado interno.

En cuanto al sector frutícola de Michoacán, según datos de la SAGARPA se cultivaron 62 especies y variedades de frutas en el 2004, siendo el aguacate la principal fruta con una participación del 48% del total de la superficie cultivada de frutas. En el 2004, el aguacate contribuyó con el 36% del valor total de la producción agrícola del estado y dentro del segmento de frutas participó con el 69% del valor total. En el 2005, Michoacán participó con más 87% de la producción total de aguacate, ver figura



**Figura 1.2** Distribución de la producción total de aguacate a nivel nacional en el 2005

#### **1.4 Definición del problema**

La producción agrícola se ha convertido en un proceso dinámico complejo que requiere la acumulación e integración de conocimiento e información de diversas fuentes a través de modelos o sistemas de apoyo para alertar, monitorear y controlar las diferentes plagas y enfermedades que atacan a los cultivos.

En el Estado de Michoacán no se utilizan modelos o sistemas de apoyo para alertar, monitorear y controlar las diferentes plagas y enfermedades que atacan a las frutas y hortalizas de la zona. Una práctica común es que los productores medianos o pequeños, cuya producción está orientada al mercado nacional, recurren a los vendedores de pesticidas para consultar productos que les permitan atacar los problemas que se les presentan en los cultivos, lo cual es un terrible problema dado que éstos carecen de los conocimientos y experticia propios de un experto. Otro problema es que los productores están expuestos a ser asesorados por técnicos cuyo nivel varía de uno a otro en gran medida y sus criterios de solución son muy heterogéneos. Al asumir tales conductas los productores, no sólo ponen en riesgo la calidad de los productos agrícolas, sino también incurren en la generación de gastos excesivos y un uso irracional de los productos químicos o biológicos que se emplean para combatir plagas y enfermedades.

En síntesis, es imprescindible contar con una herramienta que asista al productor en el control de plagas y enfermedades, permitiéndole además una adecuada toma de decisiones, gracias a un manejo integrado de plagas y enfermedades, en la que el productor encuentre todo lo necesario para manejar sus cultivos a lo largo del ciclo de producción de cada uno de ellos, permitiéndoles además mejorar la productividad de sus cultivos, reducir costos y cuidar el medio ambiente.

Los productos agrícolas a considerar serán jitomate y aguacate, por ser de gran importancia en la agricultura de Michoacán y en general del país entero.

## **1.5 Objetivo**

Diseñar, desarrollar e implementar un Sistema Experto (SE) integrado a una estación agroclimática, que modele el proceso de diagnóstico, monitoreo y control de plagas y enfermedades en hortalizas y frutas

## **1.6 Sobre la arquitectura del Sistema Experto desarrollado**

El Sistema Experto desarrollado para los productores de Michoacán está compuesto de 3 módulos, cuyas funcionalidades permiten diagnosticar y controlar las plagas y enfermedades de los cultivos, así como un monitoreo permanente del cultivo y las condiciones climáticas para emitir alertas contra enfermedades. Para construir dichos módulos se identificó los elementos

necesarios que juegan un papel importante y su interrelación para dar el producto deseado. Los módulos que se diseñaron para controlar plagas y enfermedades son:

**Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades:** El monitoreo de enfermedades está basado en ciertas variables, que son evaluadas periódicamente por el SE. De esta forma, el SE está en capacidad de alertar al productor acerca de condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades así como el respectivo tratamiento que debe aplicar.

**Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades:** Tomando en cuenta un conjunto de elementos (los síntomas que presenta el cultivo, condiciones climáticas, número de plantas enfermas, etc.) es posible determinar de forma certera la enfermedad que está atacando al cultivo, así como la recomendación adecuada según sea el caso. Gracias a este módulo, el SE está en capacidad de diagnosticar enfermedades y recomendar productos, sus dosis e indicaciones adecuadas con la situación del cultivo.

**Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas:** De manera similar al módulo anterior, se evalúa una serie de elementos que permiten diagnosticar la plaga que está atacando al cultivo, así como la recomendación respectiva. De esta forma, el SE está en capacidad de diagnosticar plagas y recomendar productos, sus dosis e indicaciones adecuadas con la situación del cultivo.

Finalmente, otro elemento que vale la pena destacar es que el Sistema Experto será alimentando con datos de variables climáticas provenientes de estaciones agroclimáticas, que se encuentran en los cultivos de los productores. Esto, porque el clima juega un rol importante como se verá más adelante cuando se explique el desarrollo del SE en el capítulo 4.

## **1.7 Organización del trabajo**

Esta tesis está organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se presentan conceptos relevantes a manejo de cultivos. Veremos aspectos relacionados al desarrollo de un cultivo, como por ejemplo métodos de estimación del desarrollo del mismo, tipos de controles que se aplican contra plagas y enfermedades, entre otros.

En el capítulo 3 se presentan diversos conceptos esenciales sobre la tecnología de sistemas expertos, así como una metodología base que nos sirvió para el desarrollo del presente trabajo.

En el capítulo 4 se describe detalladamente el desarrollo del sistema experto propuesto, iniciando por la conceptualización del mismo, los módulos que lo integran, los mapas de dependencia, los formatos de adquisición de conocimiento, construcción de reglas, etc.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos tras la realización del presente trabajo. Comentamos la forma en que se llevó a cabo los experimentos, los módulos construidos para validar las reglas de forma visual, que también pueden servir como módulos de explicación para los futuros desarrolladores que darán mantenimiento al Sistema Experto.

Finalmente, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones, principales contribuciones y trabajos futuros que pueden ser la extensión del presente trabajo.

### Conceptos fundamentales sobre manejo de cultivos

#### 2.1 Fenología agrícola

Se refiere a los fenómenos periódicos que presentan las plantas y su relación con las condiciones ambientales tales como temperatura, luz, humedad, etc. Fenómeno es toda manifestación de un hecho y fenómenos periódicos son las manifestaciones externas que se producen en los vegetales, con algunas variaciones, año tras año y en las mismas épocas: aparición de las hojas, floración, maduración, etc. El ciclo vital de un vegetal implica el nacimiento, crecimiento, desarrollo, reproducción y muerte.

Las observaciones fenológicas en la agricultura son de suma importancia ya que el conocimiento de las necesidades climáticas de una especie vegetal, permite una mejor elección del tipo de producción a implementar en una zona o región. Es decir que, la observación y cuantificación de los distintos fenómenos de los vegetales, que se relacionan con los factores climáticos, significan un paso en el conocimiento de las formas y metodologías que permitan un uso racional del medio ambiente en beneficio de la producción.

En adelante emplearemos el término fenología para referirnos a este concepto.

#### 2.2 Estimación de la fenología

Para la estimación de cultivos se han desarrollado diversos modelos que varían en complejidad, siendo el más utilizado el método de las Unidades Calor.

La temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos. Las plantas y los animales invertebrados requieren de cierta cantidad de calor para desarrollarse de un punto de su ciclo a otro. Esta cantidad acumulada de calor es conocida como tiempo fisiológico. Teóricamente, el tiempo fisiológico proporciona un punto de referencia común para el desarrollo de organismos. La cantidad de calor requerida para que un organismo complete su desarrollo no varía. El tiempo

fisiológico se expresa y aproxima en lo unidades llamadas Unidades Calor o Grados Días. En el sitio [11] de Internet es posible encontrar mayor información al respecto.

Para calcular las unidades calor acumuladas por un organismo durante un día se aplica la siguiente fórmula:

$$((T_{Max} + T_{Min}) / 2) - UmbInf$$

Donde:

TMax es la temperatura máxima registrada en el día.

TMin es la temperatura mínima registrada en el día.

UmbInf es el umbral inferior de desarrollo para el cultivo, que viene dado por la temperatura por debajo de la cual el desarrollo se detiene.

Otra forma de estimar el desarrollo de un cultivo es a través de los días transcurridos a partir de la siembra o transplante. Esta estimación es menos exacta, sin embargo es también es muy utilizada en la practica.

### **2.3 Plagas**

La definición de plaga es totalmente orientada hacia el beneficio humano. Los organismos designados como plagas compiten con el hombre por comida, refugio o territorio; transmiten patógenos causando graves problemas de salud pública. Cualquier tipo de organismo cuyas poblaciones aumentan desmesuradamente, se considera como plaga. Se puede afirmar que antes de nuestra aparición en la tierra no había plagas; miles de organismos competían por la supervivencia. De una manera estricta, y desde el punto de vista ecológico, no hay especies deseables o indeseables, útiles o inútiles, todas forman parte de las grandes cadenas biológicas que dan sustento a la vida. Los organismos que se convierten en plagas no están limitados a ninguna clase, pylum o reino. Por ejemplo, un número grande de ácaros, nematodos, moluscos y otros invertebrados han sido graves plagas. De igual manera, vertebrados como los roedores, venados, coyotes y pájaros lo han sido también en algunas situaciones especiales.

Las plagas que sirven como transmisores de patógenos se denominan vectores. Es decir, estos insectos llevan virus dentro de sus organismos, los cuales producen enfermedades en los cultivos, cuando esto ocurre en un cultivo, se afirma que dicho cultivo tiene virosis.

En la tabla 2.1 se mencionan las principales plagas que atacan a los cultivos de jitomate y aguacate en Michoacán.

**Tabla 2.1** Principales plagas que atacan a los cultivos de jitomate y aguacate en Michoacán.

Cultivo	Plaga
Jitomate	Afidos
	Araña roja
	Chicharritas
	Diabrotica
	Gallina ciega
	Grillos
	Gusano de alambre
	Minador de la hoja
	Mosca Blanca
	Nematodos
	Paratrioza
	Trips
	Trozadores
	Aguacate
Araña roja	
Araña telarañera	
Barrenador de ramas	
Barrenador pequeño del hueso	
Gusano enrollador de la hoja	
Minador de la hoja	

#### 2.4 Desarrollo de los insectos

Los insectos se dividen en 2 grupos de acuerdo a la forma en que cambian durante su desarrollo, dicho cambio se denomina metamorfosis, que significa “cambio de forma”. Las plagas pueden tener metamorfosis simple o completa.

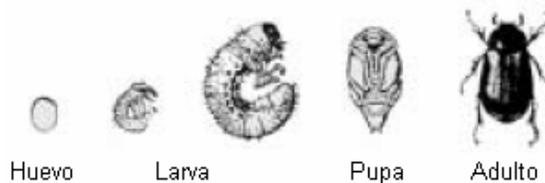
Los insectos que presentan metamorfosis simple eclosionan de un huevo y se parecen a los insectos adultos, con la diferencia que mientras son inmaduros (ninfas) no tienen alas. Las ninfas periódicamente mudan, haciéndose cada vez más grandes. Después de la última muda, las ninfas se convierten en adultos y generalmente tienen alas. Muchas plagas, por ejemplo los afidos, desarrollan mediante este tipo de metamorfosis. A menudo se encontrarán ninfas y adultos juntos en el cultivo y por lo general se alimentan de la misma comida.



**Figura 3.1** Desarrollo con metamorfosis simple.

Los insectos que desarrollan mediante metamorfosis completa hacen un cambio radical en apariencia desde inmaduros hasta adultos. Por ejemplo: moscas, escarabajos, mariposas, etc.

Los insectos recién salidos del huevo se llaman larvas. La tarea de una larva es comer y crecer, por lo general mudan 4 o 6 veces y se convierten en pupas. Una pupa es un estado inactivo del desarrollo del insecto. Durante este estado, el cuerpo del insecto se reordena resultando en un cambio completo de forma. Las larvas y adultos son tan diferentes que no se alimentan de la misma comida y necesitan diferentes hábitats.



**Figura 2.2** Desarrollo con metamorfosis completa.

## 2.5 Muestreos

Para el manejo de plaga es importante determinar, mediante muestreos, la densidad de formas inmaduras (huevos o ninfas) y de adultos, a fin de obtener información confiable que permita inferir lo que sucede en el campo [12]. Estos muestreos permiten pronosticar la abundancia poblacional, estudiar los movimientos dentro de y entre parcelas, y evaluar el efecto de los tratamientos químicos. También, si se han establecido umbrales de acción, permiten decidir cuándo aplicar medidas de combate, según los valores obtenidos en los muestreos periódicos.

Hay varios métodos de muestreo, no sólo para las plagas, sino también para sus enemigos naturales. La selección de uno u otro depende sobre todo, del propósito del monitoreo, el costo, la disponibilidad de personal y las características del cultivo.

Dada la diversidad de métodos existentes y las constantes adaptaciones locales, es prácticamente imposible sugerir un método de muestreo único y universal. A continuación se exponen algunas experiencias específicas en Michoacán y se discuten sus ventajas e inconvenientes [13].

### **2.5.1 Distribución espacial**

Para disponer de una buena estimación de la abundancia de insectos vectores, es imprescindible conocer la distribución en el campo. De los tres patrones de distribución espacial que muestrean los organismos en la naturaleza: aleatorio, uniforme y agregado, el último es el más frecuente. Por lo general los insectos vectores presentan este patrón tanto en las parcelas como en las plantas. Pero cabe indicar que la distribución de un insecto puede cambiar al aumentar la densidad de población, variar la fenología del cultivo o cambiar las dimensiones del área muestreada.

La causa principal de las dificultades en el muestreo de insectos vectores es la distribución heterogénea de los adultos y, especialmente, de los estadios inmaduros, entre las plantas de la parcela. La distribución de cada estadio puede variar mucho entre estratos y hojas de la misma planta, plantas vecinas y sectores del campo (dependiendo de si son bordes, de los vientos predominantes, de los cultivos y malezas adyacentes, etc.).

En todos los cultivos, los adultos y ninfas permanecen en el envés de las hojas. En ciertos cultivos, cada estadio tiende a congregarse en un estrato particular de la planta. Los adultos, huevos y ninfas jóvenes son más abundantes en el follaje nuevo (en el estrato superior, generalmente), las ninfas de varios instares en el estrato intermedio, y las ninfas del último instar en el inferior, donde es común hallar muchas cubiertas ninfales vacías. Este patrón se debe a que las ninfas se desarrollan conforme la planta crece, por lo que se acumulan progresivamente en las hojas inferiores.

## **2.5.2 Técnicas y herramientas de muestreo**

A continuación se discuten varios métodos de muestreo para ninfas y adultos de insectos vectores, cada uno de los cuales tiene ventajas y desventajas, imposibles de detallar aquí. Todos permiten detectar bien los cambios en la abundancia del insecto pero, según la experiencia del autor, el de trampas adhesivas es el menos confiable [13].

Ninfas. Los recuentos del último instar ninfal, y especialmente de los “puparios”, pueden realizarse con una lupa de 10X o a simple vista. Los “puparios” son grandes, amarillentos y tienen ojos rojos; sus bordes están levemente despegados de la lámina foliar. Para el recuento de las ninfas pequeñas, de los tres instares previos, se puede utilizar una lupa de 10X o un binocular de 40X.

Adultos. Entre las técnicas y herramientas más usadas para el muestreo de los adultos de Insectos vectores están las trampas amarillas, las bandejas adhesivas, las trampas de cubeta y el recuento directo en el follaje.

### **2.5.2.1 Monitoreo mediante trampas amarillas pegajosas.**

Estas trampas son superficies pintadas de color amarillo a las que se les impregna alguna sustancia adhesiva, para capturar insectos adultos. Hay pegamentos específicos, como stiken, pero también se pueden emplear productos de uso corriente, que son más baratos tales como vaselina, aceite de motor, grasa líquida, etc. Por lo general, las trampas se colocan en forma vertical, a la altura del cultivo. Actualmente se están desarrollando trampas no adhesivas, que capturen a los adultos vivos, pero aún están en la fase experimental.

Este método de monitoreo también puede proporcionar las siguientes estimaciones relativas:

- Tendencias generales de población para un área extensa
- Tasas de inmigración en cultivos establecidos y,
- Dispersión potencial de adultos

Las trampas amarillas son baratas, fáciles de construir, fáciles de colocar y retirar de los predios; sin embargo, el conteo de insectos es tardado, su manejo es problemático por el pegamento y no refleja el incremento poblacional en el campo.

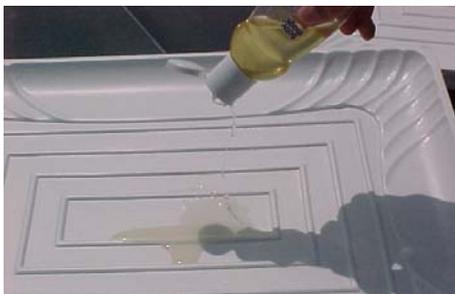


**Figura 2.3** Trampas amarillas en un cultivo de jitomate.

### 2.5.2.2 Muestreo mediante charolas

Este método de muestreo de adultos de insectos vectores consiste en usar charolas blancas o negras, de 25.4 x 40.6 cm, impregnadas con aceite comestible de cartamo o de maíz. El método es fácil de usar y es barato. Este método refleja adecuadamente el incremento poblacional del insecto en el campo.

La bandeja se coloca en sentido opuesto al viento y se golpea suavemente la planta para que los adultos vuelen hacia ella. Para mayor facilidad en el conteo se puede hacer una cuadrícula en cada charola utilizada. La cantidad capturada se puede expresar según el número de plantas muestreadas y el área de recuento en la bandeja (por ejemplo 76 adultos/625 cm<sup>2</sup>, o 19 adultos/25 plantas/625 cm<sup>2</sup>). Estas bandejas también sirven para muestrear larvas y adultos y algunos depredadores (míridos, crisópidos y coccinélidos).



**Figura 2.4** Preparación de la charola.



**Figura 2.5** Realización del muestreo con charolas.

### **2.5.2.3 Muestreo mediante inspección de hojas**

Este tipo de muestreo consiste en la inspección visual de las hojas de un determinado cultivo y permite un conteo completo de los estados inmaduros de insectos vectores debido a que los huevecillos y ninfas de las moscas blancas permanecen fijos. Este es el único método de muestreo disponible para estimar densidades poblacionales de inmaduros; sin embargo también puede ser utilizado para adultos.



**Figura 2.6** Realización del muestreo en campo.

### **2.5.2.4 Las trampas de cubeta**

Se emplean cubetas cuya capacidad varía entre 20 y 25 litros, tienen un agujero en el fondo, donde se inserta un vaso de plástico transparente con el interior recubierto de agua. Se colocan las trampas sobre las plantas, que se golpean por debajo; los adultos de insectos vectores –y de otros insectos- huyen hacia el vaso donde se pueden contar fácilmente. Esta técnica funciona bien con niveles poblacionales moderados o altos, y cuando las plantas son relativamente pequeñas, pues después de alcanzar cierta altura podrían lastimarse.

### **2.5.2.5 Muestreo mediante aspiradores**

Dos tipos de aspiradores son usualmente usados para muestrear adultos de mosca blanca: D-Vac y Bug Búster. Este método es un poco complicado para realizar el muestreo.

### **2.5.2.6 Muestreo visual**

Este muestreo es un complemento del muestreo mediante charolas el cual consiste en hacer una revisión estimada de la cantidad de moscas blancas que vuelan, utilizando para ello un contador manual. Es conveniente contar con este instrumento, ya que permitirá hacer un conteo rápido. El contador manual en las hojas es bastante confiable, pero laborioso, se puede usar un espejo para contar los adultos en el envés de las hojas, si no, éstas deben voltearse con cuidado, para no ahuyentar a los adultos.

## **2.6 Enfermedades**

Una enfermedad se define como la alteración en la morfología y fisiología de un vegetal, en forma suficiente para ocasionar pérdidas económicas [14]. Las enfermedades constituyen uno de los elementos limitantes dentro de la producción de cualquier cultivo. De aquí que su control, sea un factor a tener presente desde la siembra o trasplante hasta la cosecha. Sin embargo muchas veces al no tener un adecuado conocimiento de los posibles microorganismos y patologías asociadas a las distintas especies, y el no saber distinguir claramente la sintomatología que producen distintos hongos, bacterias o virus en las plantas, nos lleva a aplicar medidas de control inapropiadas. De aquí que dentro de un manejo integrado de enfermedades, el correcto diagnóstico del agente causal del problema, sea clave.

Durante las últimas décadas el control de enfermedades ha ido cambiando en cuanto a la forma de enfocarlo, tomando importancia el concepto de manejo integrado ([15], [16]). Este incluye medidas culturales tendientes a reducir el inóculo o evitar condiciones propicias para el desarrollo de la enfermedad, uso de controladores biológicos y en último término empleo de medidas de control físico y químico.

Las enfermedades de los cultivos pueden ser causadas por hongos, bacterias y virus.

### **2.6.1 Enfermedades causadas por hongos**

En forma general se pueden clasificar en base a los órganos de la planta que afectan, encontrando hongos asociados al follaje (hojas y folíolos), otros que afectan el fruto, algunos que se ubican en los vasos conductores del tallo y finalmente los que atacan el sistema radical de la planta.

Del mismo modo, estos agentes fitopatógenos pueden producir síntomas diversos, como manchas necróticas en hojas, folíolos y tallos, amarillamiento del follaje, marchitez, necrosis interna en tallos y raíces, pudrición radical y de frutos. Asociado a esto, en algunos casos es posible observar el desarrollo del hongo sobre el tejido afectado, lo que puede facilitar en gran medida el diagnóstico.

Estos organismos se reproducen generalmente a través de esporas las cuales pueden ser diseminadas por el agua, viento, e incluso insectos. Estas estructuras de diseminación se pueden formar ya sea a través de mecanismos sexuales o asexuales.

### **2.6.2 Enfermedades causadas por bacterias**

Las bacterias pueden ser consideradas como los organismos más pequeños capaces de desarrollarse independientemente. Normalmente tienen forma esférica o de varilla y se pueden encontrar agrupadas en racimos, cadenas, u otras formas [17]. Por otra parte, pueden multiplicarse rápidamente a través del proceso conocido como fisión binaria, pudiendo doblar su población en periodos tan cortos como 20 minutos.

Un gran número de enfermedades causadas por bacterias pueden ser determinadas con cierto grado de seguridad por el tipo de síntomas que producen en la planta. Además, la mayoría son bastante específicas en cuanto a huésped. Así por ejemplo, *Pseudomonas syringae* pv. tomato, causante de peca bacteriana en tomate, produce pequeñas manchas necróticas en los folíolos, siempre rodeadas de una aureola clorótica muy característica [18].

Las bacterias fitopatógenas pueden sobrevivir por periodos prolongados en suelo y restos vegetales como saprófitos, o bien en malezas como poblaciones epífitas. De esta forma, a través del salpicado de agua pueden diseminarse y dar inicio a una nueva infección. Algunas incluso, pueden dispersarse a través de suelo contaminado arrastrado por el viento. Las bacterias pueden moverse fácilmente a través de herramientas, manos o ropa contaminada, pasando en este caso a tener importancia como medida de control la higiene dentro del cultivo.

En la actualidad se reconocen alrededor de 60 especies de bacterias causantes de enfermedades en plantas, que incluyen aproximadamente 300 subespecies y patovares. Entre las patologías de

mayor importancia causadas por este tipo de patógeno, se pueden mencionar aquellas que afectan hortalizas producidas por bacterias de los géneros *Xanthomonas* spp., *Pseudomonas* spp. Y *Clavibacter* spp.

### **2.6.3 Enfermedades causadas por virus**

Los virus son patógenos intracelulares causantes de numerosas pérdidas en plantas cultivadas, siendo uno de los principales factores limitantes de la producción. Las pérdidas causadas por estos agentes fitopatógenos en cultivos extensivos, frutales y hortalizas, se estiman en unos 15 billones de dólares anualmente a nivel mundial [19]. Al no existir medidas de control curativo para este tipo de enfermedades, la lucha contra estos agentes patógenos se ha basado en medidas preventivas como prácticas culturales, que incluyen control de agentes vectores, eliminación de fuentes de infección, utilización de material de propagación libre de virus y modificación en las fechas de siembra o plantación entre otras. También se recurre a la utilización de cultivares existentes desarrollados a través de programas de mejora tradicional u obtenidos empleando partes del genoma del patógeno en plantas transgénicas [20].

Entre los síntomas más comunes causados por virus, podemos mencionar los cambios de coloración en hojas y frutos (mosaicos y moteados) que corresponden a áreas de diferente color (verde claro o amarillo generalmente) alternadas con la coloración normal de estas estructuras. Estos cambios de coloración también se pueden manifestar como clorosis y bandeado de venas en hojas y anillos cloróticos o necróticos en hojas, tallos y frutos [13].

Los virus, a diferencia de otros organismos fitopatógenos se transmiten en forma pasiva a través de diferentes agentes vectores. Así, entre otros, podemos mencionar: semillas, polen, insectos, ácaros, nematodos, y hongos. De igual forma, estructuras vegetativas (estacas, rizomas, tubérculos) de propagación también pueden constituir una forma eficiente de diseminación de virosis.

La transmisión de virus por insectos, desde el punto de vista económico, es la más importante. La mayoría de los insectos vectores de virus presentan aparato bucal picador chupador (pulgones, cicadélidos-langostinos, mosquita blanca, pertenecientes al orden Homóptera), algunos son masticadores (coleópteros) o poseen aparato bucal raspador (trips).

Se han descrito enfermedades causadas por virus para la mayoría de las especies vegetales de importancia económica. Sin embargo, existen algunas enfermedades causadas por estos agentes fitopatógenos, que revisten mayor importancia en ciertos cultivos.

En la tabla 2.2 mencionamos las principales enfermedades que atacan a los cultivos de jitomate y aguacate en Michoacán.

**Tabla 2.2** Principales enfermedades que atacan a los cultivos de jitomate y aguacate en Michoacán.

Cultivo	Enfermedad
Jitomate	Tizón tardío
	Tizón temprano
	Mancha gris
	Moho Gris
	Cenicilla
	Damping-off
	Mancha Bacteriana
	Peca bacteriana
Aguacate	Antracnosis
	Roña
	Anillamiento del pedúnculo
	Tristeza del aguacatero
	Armillaria mellea
	Verticillium
	Cancer de tronco y ramas

## 2.7 Control de plagas y enfermedades

El principal método de manejo de plagas y enfermedades de los cultivos ha sido el control químico; pero, problemas tanto de contaminación ambiental, que han impactado negativamente en la biodiversidad de los agroecosistemas, como de seguridad y salud pública, inherentes a la fabricación y uso inadecuado de los agroquímicos, ha conducido a la búsqueda y desarrollo de alternativas ecológicas.

Dentro del control de plagas y enfermedades, tenemos un enfoque denominado Manejo Integrado, el cual combina instrumentos biológicos, físicos y químicos con el objetivo de minimizar riesgos económicos, de salud y ambientales.

### **2.7.1 Control químico de plagas y enfermedades**

Actualmente el control químico es el método dominante en la mayoría de las regiones agrícolas de México. Las ventajas del empleo de productos químicos son:

- Constituyen el único método de control práctico y confiable cuando las poblaciones de plagas se encuentran cerca o por arriba del umbral de acción.
- Poseen una acción curativa rápida para prevenir daños económicos.
- Ofrecen una gama amplia de propiedades, usos y métodos de aplicación para diferentes situaciones de plagas.
- Las relaciones beneficio/costo por su utilización son generalmente favorables.

Sin embargo, el control de plagas basado exclusivamente en el uso de insecticidas posee las siguientes limitantes:

- Desarrollo de resistencia de las plagas a los productos químicos.
- Efectos adversos sobre especies de enemigos naturales, polinizadores y animales silvestres
- Resurgencia de las poblaciones de plagas tratadas
- Incremento de plagas secundarias.
- Problemas con residuos en alimentos, agua y suelo.
- Daños directos por su alta toxicidad a animales y humanos.

La selección de insecticidas para un programa de manejo integrado de plagas debe basarse en los siguientes criterios: propiedades químicas del producto, su actividad biológica sobre la especie de plaga objeto de control, toxicidad a humanos y animales domésticos, sus efectos sobre los organismos no objeto de control, tales como cultivos, enemigos naturales, polinizadores y animales silvestres; así como su persistencia ambiental en el aire, agua, suelo y alimentos. Al respecto, Metcalf [21] propuso seleccionar a los insecticidas para su uso en programas de MIP con base en un sistema de calificación que considera su toxicidad aguda a humanos y animales domésticos, toxicidad global para tres importantes organismos indicadores ambientales (faisán, trucha y abeja melífera) y persistencia ambiental. De acuerdo con Pacheco [22] los criterios de

selección de productos químicos para conformar una estrategia de manejo regional de insecticidas para hacer frente al problema de desarrollo de resistencia deben basarse en los siguientes criterios:

- Estudios de efectividad biológica de insecticidas.
- Estudios de resistencia.
- Estudios de análisis del uso de insecticidas.
- Patrón de cultivos-plaga.

Como mencionamos al inicio de esta sección el control químico ha sido el método más usado, esto porque se vio defendido por una serie de intereses, tales como:

- Los fabricantes, que al sintetizar los modernos insecticidas, acapararon el dominio de una actividad (el combate de plaga), que antes fue agroecológica y que ellos simplificaron con sus productos, convirtiéndola en sólo química. Esto en si, no es malo, pero si su propaganda tendenciosa.
- Las compañías vendedoras de insecticidas y los técnicos a su servicio, que no van a permitir la caída de su negocio y fuente de ingresos.
- Los “plagueros” que sin preparación ecológica adecuada, gozan de “licencia” para diagnosticar plagas (eso no seria malo) e impunidad para prescribir productos de naturaleza sumamente peligrosa por ser biocidas mas o menos universales (esto si lo es).
- Los aplicadores profesionales de insecticidas, especialmente los aéreos.
- Las instituciones de crédito que sólo lo otorgan a quienes emplean la tecnología más avanzada (los plaguicidas que garantizan la recuperación del capital)
- La industria de transformación de alimentos y de empacado de frutas y de verduras de exportación, que exige una “fitosanidad cosmetica” casi total o “tolerancia casi cero”, contra huellas o restos de insectos, en todos los casos ilógica o absurda.
- Las asociaciones y los productores agrícolas individuales que estando permanentemente manipulados por la propaganda de la industria y el comercio de insecticidas, se convierten en fervientes creyentes de que únicamente con sus venenos y su libertad de usarlos, pueden producir lo que se exige de ellos.

### **2.7.2 Control cultural de plagas y enfermedades**

Las medidas de control cultural son modificaciones de las prácticas de manejo de los cultivos con el propósito de hacer el medio ambiente menos favorable para la reproducción, supervivencia y dispersión de la una plaga. Las campañas fitosanitarias contra la Mosca Blanca se han basado fuertemente en esta táctica de control. Las medidas culturales de adoptadas en estas campañas comprenden el ajuste de fechas de siembra, cosecha y destrucción de residuos; restricción de la siembra de hospedantes susceptibles, uso de barreras físicas (por ejemplo, cubiertas flotantes y reflejantes), selección de variedades precoces, rotación de cultivos y buena sanidad de material vegetal para transplante. La eliminación de maleza hospedante es otra práctica recomendada para el manejo de la plaga; sin embargo, debe considerarse que hay maleza que actúan como reservorio de insectos benéficos, tales como la lechuguilla (*Lactuca serriola*) donde la mosca blanca es parasitada por *Encarsia* sp. a niveles superiores del 90% [23].

### **2.7.3 Control biológico de plagas y enfermedades**

Existe una tendencia mundial por utilizar alternativas de manejo sano de la agricultura, que garanticen sustentabilidad, seguridad ambiental y calidad en los productos alimenticios. Dentro de estas alternativas se encuentra el control biológico, el cual puede cubrir los requisitos de seguridad ambiental e inocuidad.

Todo ser vivo es el resultado de su herencia y de su medio. Así han sobrevivido hasta hoy las especies, que con sus variados componentes genéticos, se han establecido en el planeta como elemento de equilibrio universal, sólo que algunas son consideradas como adversarias del hombre porque éste las ha desplazado de su hábitat, causa por la cual se les ha mal-llamado plagas. Teniendo en cuenta lo anterior, el control biológico se define como el uso consciente de organismos vivos para reducir las poblaciones de organismos plaga o patógenos. Se consideran agentes de biocontrol a depredadores, parásitos, patógenos, competidores de las plagas, feromonas naturales y plantas resistentes [24].

El control de plagas y enfermedades de los cultivos se hace por procedimientos naturales mediante insumos biológicos aprovechando los mismos recursos del ecosistema, y buscando siempre el equilibrio de las poblaciones de plantas, insectos y microorganismos, para que no

constituyan un problema en los rendimientos. La producción de bioinsecticidas, feromonas y piretroides son técnicas con principios biológicos que no dañan el entorno [25].

El control biológico se lleva a cabo con la utilización de insectos entomófagos o benéficos, mediante la multiplicación y liberación de parásitos y depredadores (*Trichogramma*, crisopas y coccinélidos); reforzado con técnicas de muestreo frecuente, trampas de plástico amarillo, uso de feromonas e insecticidas biológicos (*Bacillus thuringiensis*, virales y hongos entomopatógenos).

Las principales ventajas del control biológico son: presenta poco o ningún efecto colateral de los enemigos naturales hacia otros organismos incluyendo al hombre; es poco frecuente o rara la resistencia de las plagas; el tratamiento con plaguicida es eliminado; el establecimiento del control es relativamente a largo término con una presencia permanente; la relación costo-beneficio es muy favorable; evita el resurgimiento de plagas secundarias; no existen problemas de intoxicaciones; los organismos entomopatógenos de acción microbial parecen ser los mejores sustitutos de los insecticidas de amplio espectro [26].

#### **2.7.4 Agentes de control biológico**

##### **2.7.4.1 Depredadores**

Estos son organismos que consumen insectos durante su vida y activamente buscan su alimento, el cual es consumido y se le denomina presa. Estos agentes de control biológico consumen un amplio rango de presas.

Insectos como el león de los áfidos (*Chrysoperla* sp), la catarinita (*Hippodamia convergens*) y ácaros de la familia Phytoseidae son de los agentes más importantes para el manejo de las plagas. De estos grupos, los de la familia Chrysopidae (*Chrysoperla carnea*, *Chrysopa nigricornis*, *Chrysopa oculata*), se caracterizan por alimentarse de presas con cuerpo blando como pulgones, ninfas de mosca blanca, larvas pequeñas de lepidópteros, escamas blandas, escamas armadas y araña roja.

*Chrysoperla carnea* llama la atención por su abundancia y amplio rango de habitats, lo que la califica como uno de los depredadores más frecuentes y colectados en campo. En México este

depredador se reproduce en 6 insectarios con una producción anual de 28.9 millones con dosis de liberación que oscila desde 2,500 hasta 25,000 huevecillos o larvas/ha, aunque normalmente se liberan 10,000 insectos/ha.

#### **2.7.4.2 Parasitoides**

Los parasitoides se caracterizan en que el individuo que se desarrolla destruye a su huésped. Se establece que los estados larvales o inmaduros es el parásito; los parasitoides adultos son de vida libre, la hembra adulta es la que busca al huésped y lo oviposita, sobre, dentro o cerca de su huésped. Para el adulto la alimentación es normalmente con néctares o secreciones de mielecillas de plantas y de los áfidos, dieta que permite una mayor longevidad y fecundidad de las hembras parasitoides.

En México la infraestructura de insectarios reproductores de organismos benéficos es de aproximadamente 43, que son operados por Comités Estatales de Sanidad Vegetal y empresas de la iniciativa privada. En el país, el parasitoide *Trichogramma* ha resultado ser el agente de control biológico más utilizado en programas de lucha biológica por incremento de plagas en diversos cultivos. Se realizan liberaciones de *Trichogramma* en 17 cultivos contra 28 especies de lepidópteros, con una producción promedio anual de 20,484 mil millones de insectos con una cobertura de 829 000 hectáreas de cultivos básicos, frutales, industriales y pastizales. Actualmente 30 laboratorios producen a este agente de control biológico. El control biológico de plagas se usa en mayor proporción para combatir la broca del café con la diseminación de la avispa denominada *Cephalonomia stephanoderis*. Otros agentes que se reproducen en México son parasitoides contra moscas de la fruta, parasitoides de las moscas de los establos y *Cotesia flavipes* contra el barrenador de la caña de azúcar.

#### **2.7.5 Agentes de control microbial (insecticidas biológicos)**

Las enfermedades de insectos fueron registradas desde tiempos remotos; sin embargo, hasta hace poco estas alteraciones se asociaron con agentes causales (patógenos). Afortunadamente, la mayoría de los microorganismos capaces de causar enfermedades en insectos no son dañinos para otros animales o plantas. Este es uno de los factores que favorecen el uso de patógenos de insectos como agentes de control.

### **2.7.5.1 Bacterias entomopatógenas**

Las bacterias son microorganismos distribuidos prácticamente en todos los hábitats. Se reproducen en ambientes aeróbicos y anaeróbicos, cálidos o fríos, luminosos u oscuros, secos o húmedos, ocupando niveles como parásitos obligados o saprofíticos, comúnmente asociados con los insectos; la mayoría de las relaciones son inocuas al insecto, sin embargo existen un gran número de especies bacterianas que les causan enfermedades infecciosas.

*Bacillus thuringiensis*. Su característica más distintiva es la presencia de un cristal que constituye la capacidad insecticida propia de la bacteria. Este cristal normalmente presenta toxicidad a una diversidad de larvas de lepidópteros, incluyendo a un número significativo de plagas agrícolas. *B. thuringiensis* es una bacteria que causa enfermedad y muerte en los insectos cuando las larvas ingieren el follaje sobre el cual ha sido aplicado el producto. El insecto deja de comer al ingerir las toxinas que produce esta bacteria y muere. Para aplicar este insecticida bacteriano, hay que tener en cuenta que el efecto sólo se logra si el insecto come del follaje previamente aplicado, ya que se trata de un efecto por ingestión, por lo cual es más conveniente aplicarlo en las etapas larvales durante las cuales los insectos comen abundantemente. *B. thuringiensis* no es solamente la bacteria sino el entomopatógeno más conocido y estudiado como agente de control microbioal, ya que más del 90% del mercado de bioinsecticidas lo cubren productos a base de esta bacteria. Algunos insectos que atacan a las hortalizas son controlados con dicha bacteria.

### **2.7.5.2 Virus baculovirus entomopatógenos**

Los baculovirus son entomopatógenos utilizados como agentes de control biológico, debido a su alto grado de especificidad, que no contaminan el ambiente y su alto rango de seguridad que representa para el hombre. Se han detectado como patógenos de lepidópteros, perteneciendo a este orden las principales plagas que provocan pérdidas económicas en la agricultura, de ahí el gran potencial de estos organismos dentro del control biológico.

Los baculovirus producen epizootias que pueden llegar a exterminar a una población plaga. Los reservorios más importantes son el suelo, follaje y la población infestada, lo cual permite al inóculo iniciar la enfermedad en generaciones sucesivas de insectos.

Se conocen cuatro tipos de virus: virus de la poliedrosis nuclear, virus de la granulosis, virus de la poliedrosis citoplasmática y virus entomopatógenos.

El efecto de este grupo de microorganismos es cuando son ingeridos por lepidópteros, los cuerpos incluidos se disuelven en el jugo intestinal liberando así las partículas virales, las cuales infectan a las células del intestino diseminándose posteriormente a otros tejidos del insecto. Al ser infestadas las larvas, éstas mueren y liberan en el ambiente cantidades de cuerpos de inclusión que infestan a más larvas o bien se acumulan en el suelo.

### **2.7.5.3 Nemátodos entomopatógenos**

Los nemátodos son organismos que causan esterilidad o muerte del insecto hospedero.

Existen asociaciones naturales entre insectos y nemátodos, en donde algunos nemátodos son capaces de parasitar insectos sanos, como son los casos de los nemátodos de los géneros *Steinernema* (Familia Steinernematidae) y *Heterorhabditis* (Familia Heterorhabditidae). Estos dos géneros aun dependen de bacterias como fuente alimenticia y han desarrollado mecanismos para transportar e introducir a insectos las bacterias del género *Xenorhabdus*. Estas bacterias son capaces de matar a los insectos en 48 horas, convirtiendo los cadáveres en un hábitat conveniente para el crecimiento y reproducción de nemátodos. Los nemátodos de insectos pueden atacar a los estadios biológicos de larva, pupa y adulto.

### **2.7.6 Insecticidas de origen vegetal**

La humanidad ha utilizado productos de las plantas para el control de insectos por varios siglos. Los insecticidas botánicos son productos derivados de vegetales, es decir, que no son sintetizados químicamente, sino que mediante ciertos procedimientos son extraídos de las plantas. Dentro de este grupo se tienen las piretrinas y alcaloides, entre otros.

#### **2.7.6.1 Piretrinas**

El piretro es el nombre común de las flores de un tipo de crisantemo y sus ingredientes activos en insectos son denominados con el nombre genérico de piretrinas. Estas se han utilizado como insecticidas de contacto desde la antigüedad.

El piretro debe su importancia a la notable rápida acción de derribo (unos cuantos segundos) que tiene sobre insectos voladores, aunado a la muy baja toxicidad para los mamíferos debido a su rápido metabolismo. Todas las piretrinas se obtienen de las cabezas florales del crisantemo (*Chrysanthemum cinerariaefolium*) por medio de la extracción con querosena o dicloruro de etileno y el extracto se concentra por destilación al vacío. La piretrina es un compuesto ampliamente utilizado en diversas especies de insectos.

#### **2.7.6.2 Tetra-nor-tri-terpenoides**

El árbol de neem o margosa (*Azadirachta indica*), es originario de la India y es la fuente de azadiractin y otros limonoides. Este árbol es un miembro de las caobas por pertenecer a la familia de las meliaceas. El azadiractin es considerado el principio activo más importante en las almendras de las semillas del neem. El azadiractin es un tetranortriterpenoide, insecticida para el control de insectos plaga de importancia económica, ya que muestra un potencial insecticida comparable a la de los más potentes productos sintéticos convencionales. Además de su especificidad (con efectos en el comportamiento, desarrollo y procesos bioquímicos peculiares en los insectos), no es mutagénico, es biodegradable y con actividad sistémica en las plantas, ya que es absorbido por hojas y raíz.

Se ha determinado que los materiales del neem pueden afectar más de 200 especies de insectos, así como garrapatas, hongos, bacterias y algunos virus. Dentro de las plagas en que se ha probado su acción, se encuentran los escarabajos mexicanos del frijol, de las papas de Colorado, langostas, chapulines, gusanos del tabaco, minadores de hoja, plagas de algodón, café y arroz, pulgones del melón y de la col, barrenador del fruto del café, gusano alfiler del jitomate, minador de los cítricos, palomilla dorso diamante, gusano cogollero, falso medidor, entre otros [27].

Los tetranortriterpenoides (limonoides) son considerados entre los más promisorios insecticidas derivados de plantas. El azadiractin tiene efectos variados sobre los insectos, entre los que se cuentan: disuasión en la alimentación y de la oviposición, inhibición del crecimiento y la muda, atenuador de la fertilidad y la fecundidad y modificación de la conducta de varias especies de plagas tanto en cultivos como en granos almacenados.

### **2.7.6.3 Alcaloides**

Los alcaloides son un grupo de compuestos nitrogenados orgánicos de origen vegetal. Muchos alcaloides tienen propiedades medicinales, alucinógenas o tóxicas. La clase de alcaloides más importantes para el control de insectos han sido los nicotinoides. Los nicotinoides son más efectivos contra insectos pequeños con cuerpo blando. La nicotina existe en las plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) como una sal, con los ácidos cítrico y málico en proporción 1:8 y se le extrae de las hojas y raíces de la planta.

## **2.8 Consideraciones del dominio del problema**

Como acabamos de ver, el manejo de cultivos, específicamente el control de plagas y enfermedades, comprenden una serie de labores que los productores deben realizar a lo largo del ciclo del cultivo. En muchos casos, los productores son asesorados por técnicos; sin embargo, el nivel de preparación y experticia de éstos es muy heterogéneo. Por otro lado, en los centros experimentales, los investigadores realizan pruebas y analizan sus resultados, con lo cual se está generando constantemente nuevo conocimiento que puede contribuir a la mejora de la productividad de los cultivos. Sin embargo, existe la carencia de una herramienta que agrupe todos estos elementos y sea puesta al alcance de todos los productores. Asimismo, podemos apreciar que el conocimiento de este dominio se encuentra relativamente bien delimitado, en cuanto a manejo de plagas y enfermedades y sin lugar a dudas, la decisión humana y el conocimiento práctico (experiencia) juegan un rol muy importante para resolver los problemas que se presentan en este dominio. Por todo ello, consideramos que un Sistema Experto es la solución al problema planteado. Asimismo, es importante resaltar que ya existen muchas experiencias exitosas de la aplicación de Sistemas Expertos en el dominio de la agricultura, como se vio en el capítulo anterior, donde se revisó el estado del arte del tema. En el siguiente capítulo conoceremos más de cerca los Sistemas Expertos, por ser la técnica que se empleó en el presente trabajo.

### Sistemas Expertos

#### 3.1 Definición

Los Sistemas Expertos (SE) son sistemas basados en conocimiento que emulan el razonamiento del experto para resolver problemas en un dominio particular de experticia [28]. Son construidos para contener conocimiento experto en una área muy bien definida. Un SE interactúa con el usuario y tiene la capacidad de explicar como se llegó a una determinada conclusión. Esto es muy importante dado que permite que los usuarios comprendan como está trabajando.

Dado que los SE emulan el razonamiento de un humano experto es importante conocer algunos conceptos al respecto.

#### 3.2 Razonamiento

El razonamiento es el proceso de trabajar con conocimiento, hechos y estrategias de resolución de problemas para arribar a una conclusión.

##### 3.2.1 Razonamiento deductivo

Los humanos emplean este razonamiento para deducir nueva información a partir de relacionar información conocida. Este razonamiento utiliza hechos de un problema o axiomas y conocimiento general relacionado entre sí en forma de reglas o implicaciones. Por ejemplo:

Implicación: Me mojaré si estoy parado en la lluvia.

Axioma: Estoy parado en la lluvia.

Conclusión: Me mojaré.

##### 3.2.2 Razonamiento inductivo

Este tipo de razonamiento es utilizado para arribar a conclusiones de carácter general a partir de un conjunto limitado de hechos, mediante el proceso de generalización. Por ejemplo:

Premisa: Los monos del Zoológico de Chapultepec comen plátanos  
Premisa: Los monos del Zoológico de Guadalajara comen plátanos  
Conclusión: En general, todos los monos comen plátanos

### **3.2.3 Razonamiento abductivo**

Abducción es una forma de deducción que permite hacer inferencias plausibles, esto quiere decir que la conclusión podría no ser correcta. Por ejemplo:

Implicación: El piso está mojado si está lloviendo.  
Axioma: El piso está mojado.  
Conclusión: ¿Esta lloviendo?

### **3.2.4 Razonamiento analógico**

Los seres humanos formamos modelos mentales de algunos conceptos a través de la experiencia y estos modelos los utilizamos, mediante razonamiento analógico, para ayudarnos a entender situaciones u objetos. Por ejemplo, si sabemos que un tigre tiene 4 patas, come carne y habitan en la India y Sudeste de Asia, y luego decimos que un león es como un tigre, entonces asumiremos que ambos tienen características en común y obviamente también habrá diferencias. De esta forma, apreciamos como el razonamiento analógico nos sirve para comprender nuevos conceptos.

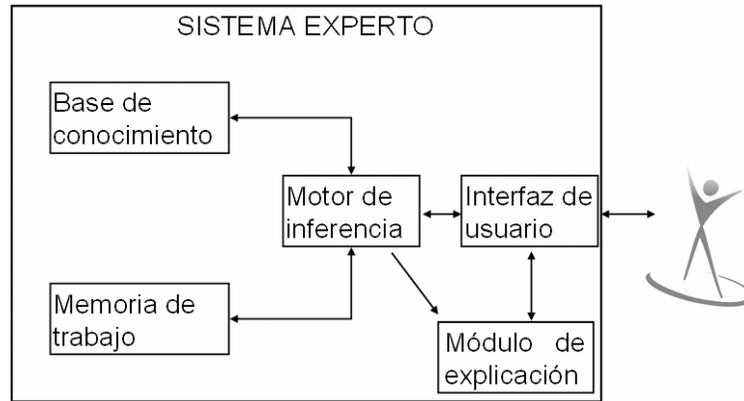
### **3.2.5 Razonamiento de sentido común**

A través de la experiencia los seres humanos aprendemos a resolver problemas de forma eficiente, para lo cual utilizamos el sentido común. Por ejemplo, un mecánico experimentado puede diagnosticar la falla de un carro con sólo escuchar el ruido o al menos le puede darle una pista de donde podría estar el problema. Este conocimiento aprendido a través de la experiencia se le denomina conocimiento heurístico.

Como mencionamos al inicio del capítulo, los SE modelan el razonamiento humano, para esto se emplea una técnica denominada inferencia. En la siguiente sección se discutirá más al respecto cuando exploremos los componentes de un SE.

### 3.3 Estructura de un Sistema Experto

En la figura 3.1 se ilustra la arquitectura de un SE.



**Figura 3.1** Arquitectura de un SE.

#### 3.3.1 Base de conocimiento

Es la parte del SE donde se almacena el conocimiento del dominio, para lo cual se emplean modelos de representación del conocimiento. En general, estos modelos sirven para construir sistemas que puedan aprender y tomar en cuenta las incertidumbres que existen entorno al conocimiento ligado al dominio específico [29].

El proceso de obtener conocimiento de expertos humanos y guardarlos de forma adecuada se denomina Ingeniería del Conocimiento [30] y la persona que realiza dicho proceso es denominado Ingeniero de Conocimiento.

##### 3.3.1.1 Reglas

La estructura más usual para representar conocimiento es la regla, a través de la cual se conecta uno o más antecedentes, llamados también premisas, en la parte del **SI**, a uno o más consecuentes, llamados también conclusiones, en la parte del **ENTONCES**.

Por ejemplo:

**SI** El carro es negro

**ENTONCES** Me gusta el carro

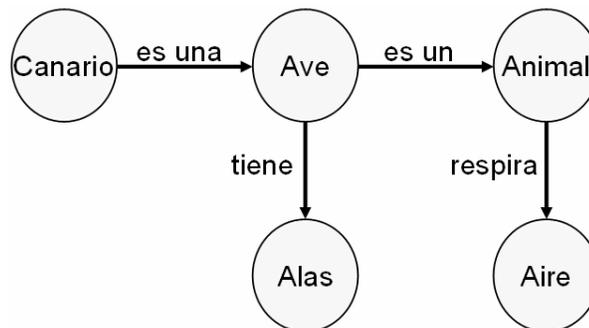
Esto quiere decir que si un carro es negro, entonces la regla infiere que me gusta el carro.

En general, una regla puede tener múltiples premisas unidas con conectores AND, OR o alguna combinación de ambos.

### 3.3.1.2 Redes semánticas

Constituyen uno de los primeros enfoques para representar conocimiento. Consisten en grafos compuestos por nodos y arcos, donde los nodos representan objetos y los arcos relaciones entre los objetos. Una red semántica proporciona una vista gráfica de los objetos importantes del problema, sus propiedades y relaciones.

En la figura 3.2 se ilustra una red semántica, donde 3 nodos representan objetos (canario, ave y animal) y dos, propiedades (tiene alas y respira aire). De este ejemplo podemos inferir que un canario es un ave y tiene alas, así como que respira aire.

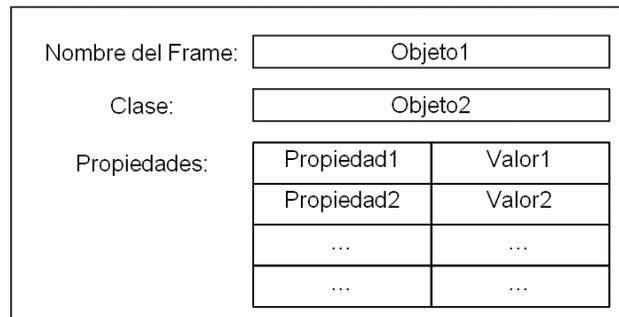


**Figura 3.2** Ejemplo de red semántica.

Aunque las redes semánticas pueden ser muy útiles para representar conocimiento, tienen limitaciones, tales como la falta de estándares en los nombres de las etiquetas. Esto puede dificultar entender si no ha sido diseñada en forma consistente. Otro problema es el nombre de los nodos. Por ejemplo, si un nodo es etiquetado como “silla”, ¿este representa: una silla específica, la clase de todas las sillas, el concepto de silla o algo más? Otro problema es la explosión combinatoria en la búsqueda de nodos.

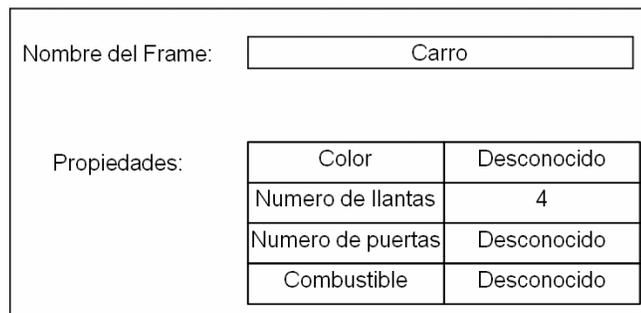
### 3.3.1.3 Frames

Un frame es una estructura de datos para representar conocimiento estereotipado de algún concepto u objeto [31]. Fue propuesto por primera vez por Minsky. En la figura 3.3 se ilustra la estructura general de un frame, donde Objeto1 es el nombre del objeto representado por el frame. También tiene campos (Propiedad1, Propiedad2, etc.) para representar sus características o atributos que describen al objeto representado. Asimismo puede incluir opcionalmente un campo llamado clase, que sirve para representar una relación de pertenencia, en este caso Objeto1 “es del tipo”/”pertenece a la clase” Objeto2, donde ésta ultima representa a otro frame: un frame clase.



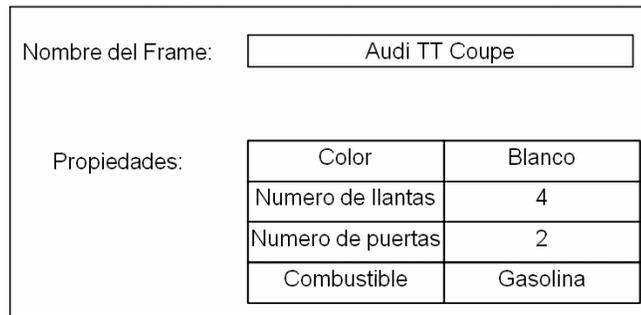
**Figura 3.3** Estructura general de un frame.

Un frame clase sirve para representar las características generales de un conjunto de objetos. Por ejemplo, se puede crear un frame clase para representar carros, tal como se ilustra en la figura 3.4



**Figura 3.4** Frame Carro.

Para representar una instancia de un frame clase, empleamos un frame instancia, veamos la figura 3.5



**Figura 3.5** Frame Audi TT Coupe.

### 3.3.2 Memoria de trabajo

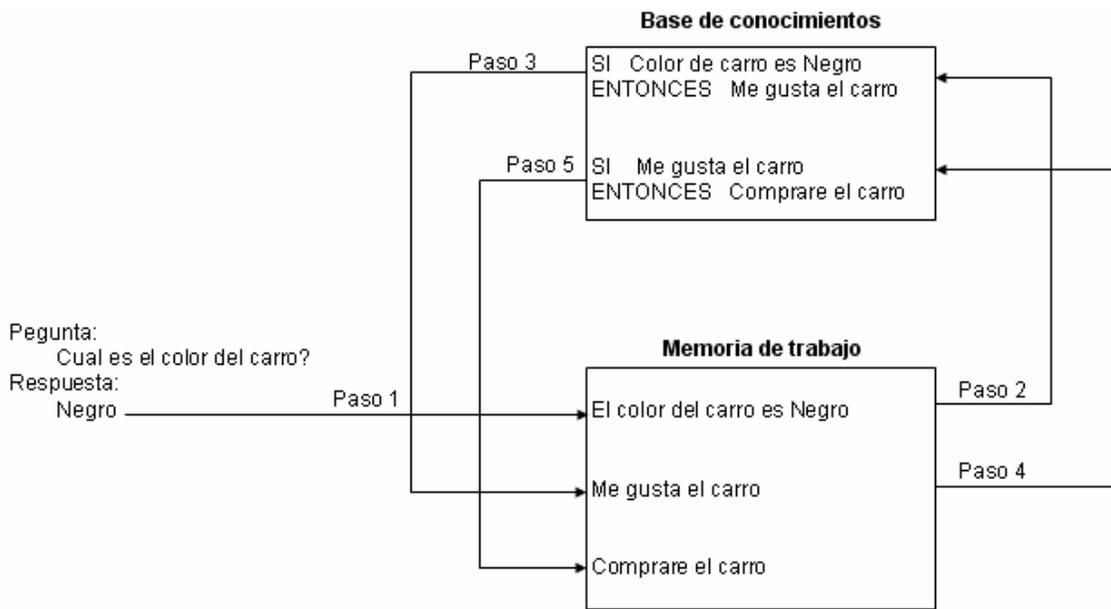
Contiene los hechos acerca del problema, los cuales son descubiertos durante una sesión. Durante una consulta con un SE, el usuario ingresa información del problema dentro de la memoria de trabajo. El SE relaciona esta información con el conocimiento almacenado en su base de conocimiento para inferir nuevos hechos. El SE ingresa estos nuevos hechos en su memoria de trabajo y el proceso de relacionar continua. En algún momento el SE llega a una conclusión, la cual también ingresa a la memoria de trabajo. La memoria de trabajo contiene toda la información que es ingresada por el usuario o inferida por el SE.

### 3.3.3 Motor de Inferencia

Se encarga de relacionar los hechos contenidos en la memoria de trabajo con el conocimiento del dominio almacenado en la base de conocimiento para arribar a conclusiones acerca del problema. El proceso de inferencia puede ser:

- Encadenamiento hacia adelante o Data-driven: partiendo de un estado inicial llegar a un estado final de manera iterativa.

La figura 3.6 ilustra como funciona un SE con encadenamiento hacia adelante.



**Figura 3.6** Funcionamiento de un SE con encadenamiento hacia adelante.

El proceso comienza cuando el SE pregunta al usuario el color del carro. El SE toma la respuesta e ingresa este hecho en la memoria de trabajo, paso 1. Esta afirmación encaja en la premisa de la primera regla, paso 2. Esto ocasiona que la regla se dispare y su conclusión "Me gusta el carro" es agregada a la memoria de trabajo, ver paso 3. Este nuevo hecho encaja con la premisa de la segunda regla, paso 4. Esto ocasiona que la regla se dispare y que su conclusión sea agregada a la memoria de trabajo, paso 5. Dado que no existen más reglas que el SE pueda considerar, el proceso termina.

- Encadenamiento hacia atrás o Goal-driven: partiendo de una meta se busca las premisas o el estado inicial que conduce a esa conclusión. Supongamos que tenemos las siguientes 3 reglas:

Regla 1:

**SI** Hay signos de infección en la garganta  
**Y** Hay evidencia de que el organismo es un estreptococo  
**ENTONCES** El paciente tiene amigdalitis

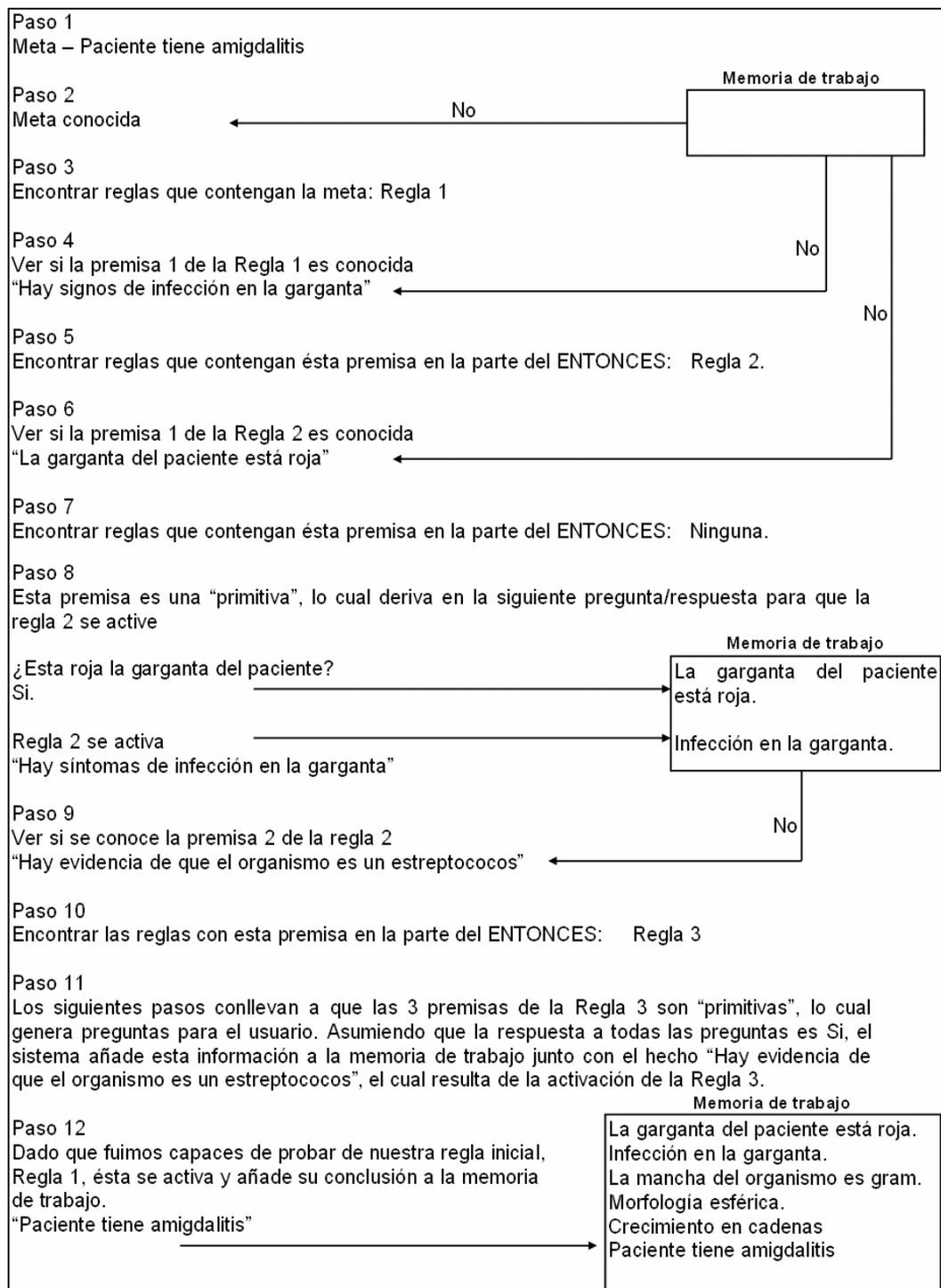
Regla 2:

**SI** La garganta del paciente está roja  
**ENTONCES** Hay signos de infección en la garganta

Regla 3:

**SI** La mancha del organismo es gram  
**Y** La morfología del organismo es esférica  
**Y** El crecimiento del organismo es formando cadenas  
**ENTONCES** Hay evidencia de que el organismo es un estreptococo

El objetivo es probar la meta “El paciente tiene amigdalitis”, que es la conclusión de la Regla 1. En la figura 3.7 se muestra en detalle del proceso del encadenamiento hacia atrás seguido para este ejemplo.



**Figura 3.7** Funcionamiento de un SE con encadenamiento hacia atrás.

### **3.3.4 Interfaz de usuario**

La interfaz de usuario es un elemento fundamental para la aceptación del SE por parte de los usuarios, lo cual conllevará al éxito del proyecto. El éxito o el fracaso de muchos proyectos han estado vinculados a la aceptación de los usuarios [32].

En el diseño de la interfaz hay que poner mucho énfasis en la claridad de las preguntas, dado que estas nos permitirán obtener información confiable. Mas adelante mencionamos consejos prácticos acerca de este tema.

### **3.3.5 Módulo de explicación**

El módulo de explicación proporciona al usuario explicaciones acerca del proceso de inferencias, cuando éstas son solicitadas. Las explicaciones ofrecidas al usuario responden a la formulación de las siguientes preguntas:

- ¿Cómo se alcanzó una hipótesis o conclusión?
- ¿Por qué se requiere cierta información?

Para responder a la primera de estas preguntas, el módulo de explicación exhibe al usuario, en una forma que resulte de fácil comprensión, la cadena de reglas disparada durante el proceso de inferencias. De esta manera, el usuario puede apreciar la línea de razonamiento seguida por el sistema para arribar a la conclusión.

La respuesta del módulo de explicaciones a la pregunta ¿por qué? consiste en explicar al usuario el papel que juega la información solicitada en la consecución de algún paso necesario dentro del proceso de razonamiento.

De esta forma, a través del módulo de explicación el usuario puede seguir muy de cerca el proceso de inferencias llevado a cabo durante la solución de un problema.

### **3.4 Construcción de un Sistema Experto**

Un Sistema Experto se puede construir en lenguajes basados en IA como LISP o Prolog, o en lenguajes de propósito general como C/C++, etc. También se pueden emplear shells como:

- Visual Rule Studio, es un entorno de desarrollo de reglas, orientado a objetos, disponible para plataformas Windows. Esta herramienta se instala como parte de Visual Basic 5.0, 6.0 y .Net, brindando al programador la facilidad de trabajar con las reglas en el mismo entorno de desarrollo de Visual Basic.
- Jess, es un herramienta desarrollada en Java que brinda un entorno gráfico para el desarrollo de reglas, el cual esta basado en Eclipse.
- ESTA, es un shell construido en Visual Prolog, lenguaje de programación que tiene su propio entorno gráfico para desarrollo de interfaces.
- wxCLIPS, es una extensión de CLIPS, que permite desarrollar SE con interfaces gráficas de usuario. Se puede ejecutar en UNIX, Linux y Windows.

Sin embargo, al emplear este tipo de herramientas, el usuario puede perder cierta flexibilidad dado que tiene que limitarse a la estructura/representación del ambiente del shell y también hay que considerar la plataforma sobre la cual funcionara el SE, entre otros factores, a los cuales nos referiremos más adelante en este capítulo. A pesar de ello, son utilizados para construir prototipos para analizar la factibilidad y cuestiones prácticas. El uso de lenguajes de propósito general evita todas las restricciones, pero puede consumir mucho más tiempo.

### **3.5 El Ingeniero del Conocimiento**

Es la persona que diseña, construye y prueba un SE. El ingeniero de conocimiento trabaja con un experto humano para identificar y refinar el conocimiento que se necesita para resolver un tipo particular de problemas. La esencia del trabajo del ingeniero del conocimiento consiste en obtener el conocimiento del experto humano durante una serie de entrevistas y sesiones de observación para estudiar conjuntamente como resuelve el sistema los casos presentados y determinar como mejorarlo.

El ingeniero de conocimiento debe organizar el conocimiento obtenido del experto de tal forma que pueda ser trasladado al SE. Específicamente, debe estructurar el conocimiento y la forma de

resolver el problema de tal suerte que el SE pueda resolver problemas de manera similar al experto humano. Asimismo, el ingeniero del conocimiento es el responsable de codificar, probar y revisar el sistema. Luego de haber concluido el proyecto, también puede ser responsable del mantenimiento del sistema.

El ingeniero del conocimiento debe tener las siguientes características y destrezas:

- Habilidades de cómputo : hardware, software, programación
- Tolerancia
- Capacidades de comunicación : sensibilidad, tacto, diplomacia
- Amplia educación
- Habilidades verbales, socialmente sofisticado
- Capacidades de rápido aprendizaje (de diferentes dominios)
- Comprensión de organizaciones e individuos
- Inteligencia
- Enfático y paciente
- Persistente
- Pensamiento lógico
- Versátil e inventivo

### **3.6 Tipos de Sistemas Expertos**

Una de las mejores formas de conocer el desempeño y la importancia de los Sistemas Expertos es a través de las diferentes tareas genéricas que son capaces de ejecutar. La amplia gama o tipología de los Sistemas Expertos conocida hoy en día es consecuencia de la gran variedad de dominios de problemas explorados [33]. Existen Sistemas Expertos para la interpretación, la predicción el diagnóstico, el diseño, la planeación, el monitoreo, la depuración, la reparación, la instrucción, el control y otros tipos de tareas [34]. A continuación veremos algunos de ellos.

#### **3.6.1 Sistemas Expertos para la predicción**

Predicción significa pronosticar los eventos que ocurrirán en el futuro a partir de un modelo de ocurrencia de estos eventos en el pasado y en el presente.

A la predicción le es inherente un razonamiento basado en el tiempo. Un sistema de predicción debe poseer habilidades para tratar con eventos que cambian en el tiempo y con los que poseen un orden en el mismo, además de contar con modelos adecuados para la forma en que determinadas acciones influyen en el estado del medio ambiente modelado sobre el tiempo. Los sistemas para la predicción requieren de la integración de información incompleta. Estos Sistemas Expertos deben ser capaces de explicar todos los futuros posibles mediante razonamiento hipotético, así como indicar la sensibilidad de las predicciones a variaciones en los datos de entrada.

Es muy común que los sistemas expertos para la predicción usen un modelo paramétrico dinámico, el cual ajusta los valores de los parámetros para cada situación dada. Las consecuencias que se infieren a partir de este modelo forman las bases para la predicción. El dominio de Sistemas Expertos para la predicción incluye sistemas para el pronóstico del tiempo, predicciones demográficas y de tráfico, estimaciones de cosechas y pronósticos militares, entre otros.

Los sistemas orientados a objetos son usualmente los más aceptables para esta clase de problemas, aunque los orientados a procedimientos y los basados en reglas con encadenamiento hacia adelante también resultan útiles.

### **3.6.2 Sistemas Expertos para el diagnóstico**

El diagnóstico es el proceso mediante el cual se buscan las fallas o los desperfectos en un sistema. Un sistema experto para el diagnóstico es un sistema que infiere las fallas o el mal funcionamiento de un sistema a partir de la interpretación de los datos observados, los cuales son potencialmente ruidosos, inseguros o incompletos. El dominio de Sistemas Expertos para el diagnóstico incluye sistemas para el diagnóstico médico, electrónico, mecánico y de software, entre otros.

Los sistemas basados en reglas con encadenamiento hacia atrás han sido frecuentemente empleados para resolver problemas del tipo diagnóstico. Por otra parte, los sistemas basados en redes neuronales resultan muy útiles para problemas de diagnóstico, sobre todo cuando este resulta marcadamente dependiente del reconocimiento de patrones. La combinación de sistemas basados en reglas y en redes neuronales también ha resultado ser muy útil para este tipo de problemas.

### **3.6.3 Sistemas Expertos para el diseño**

El diseño es la descripción de objetos a partir de ciertas restricciones o requerimientos establecidos. Un Sistema Experto para el diseño es aquel que desarrolla configuraciones de objetos que satisfacen las restricciones del problema a diseñar. Estos sistemas construyen descripciones de objetos, los cuales se pueden encontrar en relación con otros objetos, y verifican que estas configuraciones respondan a las restricciones establecidas. Muchos Sistemas Expertos para el diseño intentan minimizar una función objetivo que mida el costo u otras propiedades no deseables para el diseño potencial.

El dominio de los Sistemas Expertos para el diseño incluye sistemas para el diseño de circuitos y construcciones y para el de presupuestos, entre otros.

Los Sistemas Expertos basados en reglas con encadenamiento hacia adelante han resultado ser muy útiles para aplicaciones de diseño. Los basados en frames, los orientados a procedimientos y los basados en la lógica son también muy útiles para sistemas de diseño.

### **3.6.4 Sistemas Expertos para la planificación**

La planeación es la preparación de un programa o secuencia de acciones, las cuales, al ser llevadas a cabo, permiten alcanzar una meta deseada. Cuando un planeador construya un plan de acciones, vigila que no se consuman excesivos recursos ni que sean violadas restricciones establecidas. Si algunas de las metas entran en conflicto, el planeador debe establecer prioridades entre éstas. Un planeador debe ser flexible y oportunístico, teniendo en cuenta que los requerimientos de planeación pudieran no ser completamente conocidos o cambiar en el tiempo.

El dominio de los Sistemas Expertos para la planeación incluye sistemas de programación automática, robótica, proyectos, rutas, comunicaciones, experimentos y planeación militar, entre otros.

Los Sistemas Expertos basados en reglas con encadenamiento hacia adelante, los basados en frames y los orientados a objetos o procedimientos son generalmente muy útiles para el desarrollo de Sistemas Expertos dedicados a la planeación.

### **3.6.5 Sistemas Expertos para el monitoreo**

El monitoreo significa la interpretación continua de señales de entrada y el control y la activación de alarmas cuando éstas son requeridas. Un Sistema Experto para el monitoreo es un sistema que realiza diagnósticos parciales a partir de interpretaciones continuas. El requerimiento alarmas es en tiempo real. Las condiciones de alarma dependen del contexto en el que evoluciona el sistema. El dominio de Sistemas Expertos para el monitoreo incluye sistemas para el monitoreo de plantas nucleares, de procesos industriales de alto riesgo, de tráfico aéreo y de pacientes de salas de cuidados intensivos, entre otros.

Los Sistemas Expertos basados en reglas con encadenamiento hacia atrás son generalmente muy útiles para este tipo de aplicación. Los sistemas asentados en la lógica y las combinaciones de sistemas basados en reglas con encadenamiento hacia atrás y frames son también beneficiosos para este tipo de aplicación.

### **3.6.6 Sistemas Expertos para la reparación**

Los sistemas expertos para la reparación desarrollan y ejecutan planes para la administración de remedios cuando se ha diagnosticado algún problema. Estos sistemas exhiben capacidades de depuración y planeación.

El dominio de estos Sistemas Expertos incluye sistemas para el mantenimiento de computadoras y de redes, entre otros.

Los Sistemas Expertos basados en reglas con encadenamiento hacia atrás resultan ser muy útiles para este tipo de aplicación. También los basados en la lógica y una combinación de sistemas basados en reglas con encadenamiento hacia atrás con los basados en frames resultan beneficiosos para el desarrollo de sistemas de este tipo.

### **3.6.7 Sistemas Expertos para el control**

Los Sistemas Expertos para el control modifican de forma adaptativa el comportamiento total de un sistema. Para lograr esto, el Sistema Experto debe interpretar continuamente la situación

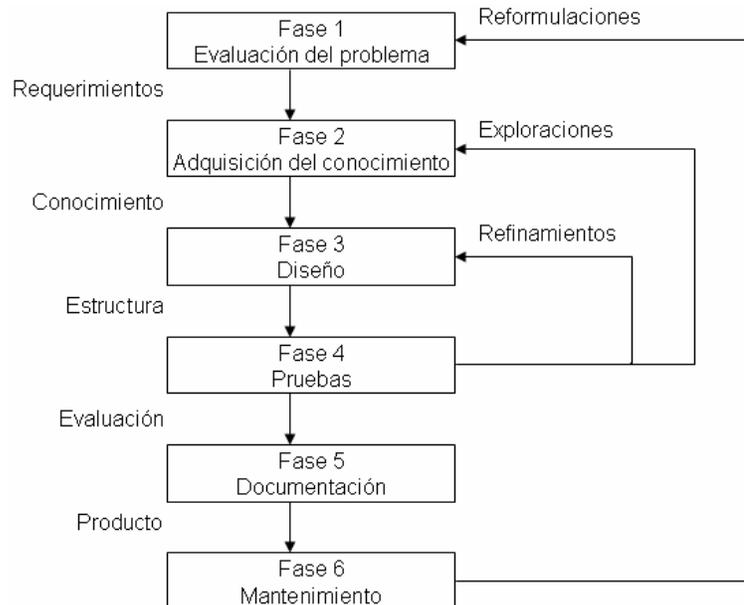
actual, pronosticar la situación futura, diagnosticar por anticipado las causas de problemas, formular un plan “remediar” y monitorear su ejecución para garantizar el éxito en el comportamiento del sistema, entre otras tareas. Un sistema para el control posee capacidades de interpretación, diagnóstico, pronóstico, monitoreo, depuración y reparación.

El dominio de Sistemas Expertos para el control incluye sistemas para el control de tráfico aéreo, de líneas de producción automatizadas y de equipos de vida artificial en salas de terapia intensiva, entre otros.

Los sistemas orientados a procedimientos, a objetos y los basados en reglas con encadenamiento hacia adelante son considerados los mejores para aplicaciones de control.

### 3.7 Metodología para el desarrollo de un Sistema Experto

Básicamente existen 6 fases bien definidas en el desarrollo de un SE [28]. Estas fases se ilustran en la figura 3.8.



**Figura 3.8** Fases para el desarrollo de un SE.

Cabe mencionar que en la práctica estas fases no son estrictamente secuenciales, sino que se pueden traslapar. Asimismo el proceso es iterativo. El SE va tomando forma a medida que se van efectuando cíclicamente estas tareas.

### **3.7.1 Evaluación del problema**

El objetivo de esta fase consiste en determinar si un SE es la solución al problema que se quiere resolver. Asimismo, se debe realizar estudios de factibilidad y costo beneficio. Los problemas a resolver mediante la implementación de un SE tienen las siguientes características:

- Toma de decisión humana: El problema requiere la decisión de un humano para ser resuelto.
- Conocimiento heurístico: El experto emplea reglas producto de experiencias pasadas para resolver el problema.
- Pequeño: El ámbito del problema está bien limitado.
- Simple: Existen SE que han sido aplicados a la misma área del problema.

### **3.7.2 Adquisición del conocimiento**

Esta fase es la más difícil en el desarrollo de un SE. La adquisición de conocimiento es un proceso netamente cíclico. Consiste en recolectar información, interpretarla, analizarla y diseñar métodos para recolectar conocimiento adicional.

- Recolección: Consiste en obtener información del experto a través de entrevistas. Se requiere de buenas habilidades de comunicación interpersonal, así como la habilidad de obtener la cooperación del experto.
- Interpretación: Se debe detectar las piezas claves de la información recolectada, es decir, conceptos, reglas, estrategias, etc.
- Análisis: Involucra el estudio de piezas claves de conocimiento no cubierto durante las entrevistas.
- Diseño: Es la tarea de prepararse para la siguiente reunión con el experto. Los nuevos conceptos que puedan haber surgido requieren una mayor exploración, es por ello que es imprescindible prepararse para las siguientes reuniones.

Es importante mencionar que en esta fase hay que tener mucho cuidado para saber manejar los problemas que pudieran presentarse, como por ejemplo:

- **Perdida de conocimiento:** A medida que los expertos van ganando experiencia resolviendo un problema, suelen compilar todo su conocimiento de una forma compacta, la cual le permite resolver los problemas eficientemente. Sin embargo, a la hora de preguntarle al experto cuales son sus métodos para resolver un problema, él pasará por alto detalles que pueden ser muy importantes, sin darse cuenta.
- **Incapacidad de verbalizar el conocimiento:** Muchas tareas son difíciles de verbalizar dado que fueron aprendidas al ver a otra persona realizarlas.
- **Brindar conocimientos irrelevantes:** A lo largo del proyecto se pueden realizar muchas sesiones con los expertos, por lo que la cantidad de información recolectada puede ser abrumadora. Lo que empeora las cosas es que mucha de esta información puede ser irrelevante para el proyecto.
- **Conocimiento incompleto:** Los expertos a menudo brindan conocimiento incompleto de sus procesos mentales. Esto puede deberse a simples omisiones o también ellos mismos no son conscientes de todo el conocimiento que emplean.
- **Conocimiento inconsistente:** El conocimiento obtenido puede ser inconsistente con supuestos establecidos con anterioridad.

### **3.7.3 Diseño del sistema**

Luego de haber tenido algunas sesiones con el experto, se alcanza un buen entendimiento del problema para comenzar a diseñar el SE. Esta fase comienza con la selección de la técnica de representación del conocimiento y la estrategia de control. Luego, se debe seleccionar el software a emplear para la construcción del SE. Se debe construir un pequeño prototipo del sistema que sirva para ser validado por los expertos y que sirva de guía para la continuación del proyecto. Luego viene el desarrollo del SE, el cual debe ser refinado para que cumpla totalmente con los objetivos del proyecto. Todo este proceso es expuesto a continuación:

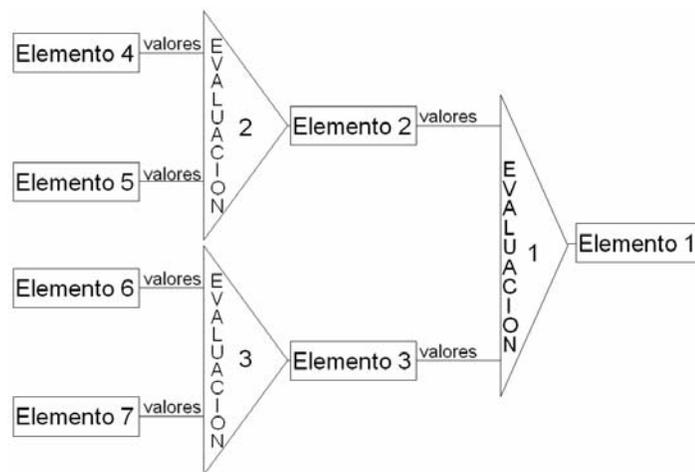
### 3.7.3.1 Técnicas de representación del conocimiento

Entre las técnicas más usadas para representar el conocimiento tenemos a los frames y las reglas, cuyas estructuras ya fueron vistas en secciones anteriores; sin embargo, aquí mencionamos algunas situaciones en las cuales son más apropiadas emplearlas.

- Frames: Esta representación es apropiada si el experto describe el problema haciendo referencia a objetos y sus relaciones, sobretodo cuando el estado de un objeto afecta a otro. Esta situación se da por lo general en problemas de simulación.
- Reglas: Son apropiadas cuando el experto discute el problema empleando enunciados del tipo SI/ENTONCES.

### 3.7.3.2 Mapas de conocimiento

Son gráficos muy importantes que sirven para representar los elementos claves del dominio del problema y sus interrelaciones. Un diagrama muy útil a partir del cual se pueden obtener las reglas es el Diagrama o Mapa de Dependencia [33] [34], en el cual los elementos están vinculados por una relación de dependencia. En la figura 3.9 se muestra un esquema general de un diagrama de dependencia.



**Figura 3.9** Esquema de un diagrama de dependencia.

Por elemento, debemos entender cualquier concepto (atributo, objeto, entidad abstracta) al cual se le puede asignar valores. Por ejemplo:

Elemento: Temperatura  
 Valores: 10°C-20°C  
 Elemento: Condición climática  
 Valores: - Favorable para desarrollo de Enfermedad  
 - No Favorable para desarrollo de Enfermedad

Para el caso de la figura 3.9, el elemento 1 depende de los valores de los elementos 2 y 3, los cuales a su vez dependen de los valores de 4 y 5, y 6 y 7, respectivamente.

El triangulo representa la evaluación de los valores de los elementos. A continuación se muestra un ejemplo tomado del desarrollo del SE.



**Figura 3.10** Diagrama de dependencia para la Estimación de Fenología de un cultivo.

La figura 3.10 ilustra el dominio de la estimación de la etapa fenológica de un cultivo. La etapa fenológica depende de las fechas estimadas para cada etapa fenológica y de la fecha actual.

A partir de este diagrama podemos definir la tabla 3.1 que nos permitirá recolectar información a partir de la cual escribiremos las reglas correspondientes.

**Tabla 3.1** Tabla para recolectar información correspondiente al diagrama de dependencia mostrado en la figura 3.10.

Fecha	Fechas estimadas de las Etapas Fenológicas	Etapas fenológicas
Hoy	1 Marzo – 20 Marzo	Desarrollo
Hoy	21 Marzo – 19 Abril	Floración
Hoy	20 Abril – 15 Mayo	Fructificación

Las reglas que podemos obtener de la tabla 3.1 son:

SI La fecha de hoy está entre el 1 de marzo y el 20 de marzo

ENTONCES La etapa fenológica del cultivo es Desarrollo

SI La fecha de hoy está entre el 21 de marzo y el 19 de abril

ENTONCES La etapa fenológica del cultivo es Floración

SI La fecha de hoy está entre el 20 de abril y el 15 de mayo

ENTONCES La etapa fenológica del cultivo es Fructificación

Asimismo podemos notar que las fechas estimadas para cada etapa dependerán de la fecha de inicio del cultivo y del número de días que dura cada etapa. Este ejemplo es muy sencillo pero sirve para ilustrar los diagramas o mapas de dependencia.

### **3.7.3.3 Técnicas de control**

Tras las discusiones con el experto, es posible tener una idea inicial de cómo se debe controlar el conocimiento del sistema. Para esto, es necesario pedirle al experto que resuelva un problema típico y poner mucha atención en la forma en que el experto recolecta la información y como razona para resolver el problema. También hay que prestar atención si el experto usa alguna estrategia global, por ejemplo si resuelve una parte del problema antes que otras.

Entre las formas en que podemos manejar el conocimiento tenemos:

- Encadenamiento hacia adelante: Es apropiado si el experto primero recolecta la información acerca del problema y luego piensa que puede concluir. En esta situación, los datos conducen el razonamiento.
- Encadenamiento hacia atrás: Es la mejor opción si el experto considera primero alguna conclusión y luego intenta probarla buscando información que la soporte.

### **3.7.3.4 Software para desarrollar un Sistema Experto**

Después de tener alguna idea de cómo representar y controlar el conocimiento del problema, la siguiente tarea es seleccionar el software que será empleado para desarrollar el sistema. Se deben

hacer varias pruebas para encontrar el software que satisfaga mejor las características del problema. También se debe considerar las habilidades de programación. Asimismo, en este punto hay que considerar el costo del software, aspectos de las licencias, entrenamiento y soporte, la interfaz de desarrollo e interfaz de usuario.

### **3.7.3.5 Desarrollo del prototipo**

Un prototipo es el modelo del sistema final. Su estructura básica, en términos de cómo representa y procesa el conocimiento del sistema, es igual a la que se espera que tenga el sistema final. A pesar que el prototipo es sólo una versión pequeña y limitada, servirá para los siguientes propósitos:

- Validar el enfoque del sistema experto.
- Confirmar la elección de la técnica de representación del conocimiento, así como las estrategias de control.
- Proporciona un medio para la adquisición del conocimiento.

### **3.7.3.6 Desarrollo de la interfaz**

Un error común es esperar hasta el final del proyecto para diseñar la interfaz del sistema. A estas alturas, puede darse el caso que la interfaz no puede ser construida con el software disponible. Por lo tanto, las especificaciones de la interfaz deben ser definidas desde el inicio del proyecto con la cooperación del usuario. Los puntos claves que determinan la efectividad de una interfaz son:

- **Consistencia:** La presentación de la interfaz es tan importante como la información que contiene. Cada pantalla suele presentar ciertos ítems como títulos, preguntas, área para respuestas y funciones de control. Todas las pantallas deben ser diseñadas de tal manera que ítems similares sean presentados en las mismas ubicaciones dentro de las pantallas.
- **Claridad:** Mientras el usuario desarrolla una sesión con el SE, una serie de pantallas son mostradas. Algunas de estas pantallas muestran preguntas, otras proporcionan explicaciones del razonamiento del sistema, mientras que otras pueden mostrar resultados intermedios o finales. Si todo el material de estas pantallas es presentado de una manera clara, el usuario será receptivo al sistema. Realizar preguntas claras es un aspecto importante a considerar. Las

preguntas confusas o pobremente diseñadas pueden conducir a errores en las respuestas de los usuarios. Proporcionar resultados y explicaciones claras dependerá del software de desarrollo y de las necesidades de la aplicación

- Control: El usuario debe sentir que tiene el control mientras está consultando el SE. Además, el usuario no debe estar temeroso de que los errores que pudiera cometer podrían tener consecuencias desastrosas.

### **3.7.3.7 Desarrollo del producto**

Durante el desarrollo del prototipo se realizan sesiones de adquisición de conocimiento y se van haciendo pruebas, ambas actividades servirán para descubrir nueva información que sirva de guía en el diseño del SE.

- Refinamiento del conocimiento: La fortaleza de un SE radica en su conocimiento. A medida que el conocimiento del SE se incrementa, su desempeño mejorará. Este proceso evolutivo involucra expandir y profundizar la base de conocimiento del SE.

En los sistemas basados en reglas, esto se logra añadiendo más reglas para representar nuevos conceptos y para servir de soporte a los ya existentes.

- Refinamiento del control: A pesar que al inicio del proyecto se haya optado por el encadenamiento hacia adelante o atrás, más adelante puede surgir la necesidad de intercambiarlos. Esto puede ocurrir en situaciones donde el problema comprende muchas tareas, algunas de las cuales pueden manejarse mejor con una u otra técnica.
- Refinamiento de la interfaz: Al inicio del proyecto el usuario final ayudará a definir las especificaciones de la interfaz. Mientras el sistema evoluciona, nuevos requerimientos surgirán, por lo tanto se requiere mantener al usuario final muy cerca del proceso de desarrollo. La retroalimentación que brinde el usuario pueden servir para mejorar la facilidad del sistema, la navegación en el sistema, las preguntas, aclaraciones, resultados, etc.

### **3.7.4 Pruebas y evaluación**

El SE debe ser probado y evaluado en forma periódica para confirmar que se está avanzando en la dirección correcta. Se debe definir lo que será probado, como, cuando y quienes lo harán. Es importante que todo esto se defina desde el inicio del proyecto.

El proceso de evaluación está relacionado con la validación del sistema y la aceptación del usuario [35]. La validación sirve para determinar si el sistema ejecuta satisfactoriamente la tarea que se pretende [36]. La aceptación del usuario depende de que tan bien el SE es capaz de corresponder a las necesidades del usuario. Las tareas de validación y medición de la aceptación del usuario son subjetivas y hacen que la evaluación de un SE sea compleja.

#### **3.7.4.1 Validación del sistema**

Esta comprende validar los resultados y el proceso de razonamiento. Las pruebas formales de un SE por lo general involucran el uso de casos de prueba. Un caso de prueba es un problema pasado que fue resuelto satisfactoriamente e incluye información específica del problema con sus correspondientes resultados. Durante la prueba, la información es dada al SE y se comparan las recomendaciones del sistema con los resultados del caso de prueba. Para diseñar una prueba de validación se deben tener las siguientes consideraciones:

- **Seleccionar un criterio de prueba:** Cada proyecto tiene una meta por alcanzar. Para juzgar si el proyecto tiene éxito, se debe establecer un criterio contra el cual el proyecto pueda ser medido. Cuando se pueden medir ítems tangibles como: reducción de costos, mejora de la calidad del producto, etc., es fácil demostrar el valor del sistema. Sin embargo, se debe esperar hasta que el sistema haya sido implementado en campo. Otro enfoque es comparar los resultados con los de un experto en el área.
- **Selección de los casos de prueba.**
- **Selección de los evaluadores:** Lo más recomendable es que los propios expertos sean los evaluadores cuando el sistema está diseñado para ayudar a los mismos. Si el sistema será usado por otros expertos, entonces se recomienda buscar otros expertos, que no estuvieron asociados al proyecto. Si el sistema será usado por personal no experto, ellos deben formar parte del equipo evaluador. Antes de la introducción del sistema, estas personas tienen procedimientos estándares que siguen para resolver el problema, por lo tanto están en una posición idónea para definir las bondades del sistema respecto a sus técnicas tradicionales.

### **3.7.4.2 Validación del razonamiento**

Se pueden emplear 2 enfoques para validar el razonamiento. A nivel macro, los evaluadores pueden estudiar los resultados de varios resultados intermedios que conllevan a las recomendaciones finales. A nivel micro, los evaluadores pueden rastrear todas las reglas que se usan para llegar a la conclusión.

### **3.7.5 Documentación**

A medida que el proyecto madura, la cantidad de conocimiento se incrementa al punto que puede ser aplastante. Para manejar esta situación se debe decidir la forma de documentar toda la información. La información guardada servirá no sólo para el desarrollo del SE, sino también para redactar el informe final y como referencia para el mantenimiento del sistema. Es importante documentar: el conocimiento, gráficos del conocimiento, código fuente, pruebas, transcripciones, glosario de términos específicos del dominio del problema y reportes.

La documentación debe permitir la fácil entrada de nuevo conocimiento, fácil acceso y modificación del conocimiento existente, fácil acceso a información relacionada y fácil replicación del material para la redacción de reportes.

#### **3.7.5.1 Guía para diseñar la documentación**

La documentación del proyecto debe incluir:

- Tabla de contenido
- Propósito del proyecto
- Diccionario de conocimientos: Debe contener 3 secciones: sección de reglas, de objetos y de gráficos.

La sección de reglas debe contener información de todas las reglas del SE. Esta sección debe subdividirse en otras, donde cada una esté relacionada a un conjunto de reglas específico. Es importante documentar cada regla con un título descriptivo. SE debe documentar 2 versiones de la regla: en forma de código y en lenguaje natural. Esta última servirá para la que el experto las revise.

La sección de objetos debe incluir todos los frames utilizados en el SE. Cada objeto documentado debe contener información de cómo encaja dentro de la estructura global del conocimiento e información específica acerca de sus propiedades. La información estructural viene dada por la documentación de los padres e hijos del objeto.

La sección de gráficos: Los gráficos ofrecen un mejor enfoque para representar estrategias, relaciones entre los objetos y asociaciones de reglas.

- Código fuente: Se debe documentar todo el código, esto incluye listados de cada base de conocimiento, de cada función, así como la estructura de todas las bases de datos diseñadas.
- Pruebas: Se debe documentar todas las pruebas que se hayan realizado a lo largo del proyecto
- Transcripciones.
- Personal involucrado en el proyecto.
- Glosario.
- Referencias.
- Índice.

### **3.7.6 Mantenimiento**

La mayoría de SE contienen conocimiento que está constantemente evolucionando. La organización propietaria del SE puede adquirir nuevos productos y equipos, o cambiar sus procedimientos. Estos cambios implicarían cambios en el SE. Asimismo con el uso del sistema, los usuarios pueden detectar carencias o dificultades. A continuación se describen algunas consideraciones para facilitar la tarea de mantenimiento.

- Documentación: Se debe tener una documentación completa y bien organizada.
- Piensa en el mantenimiento durante el diseño. Entre los aspectos más importantes a considerar durante el diseño tenemos:
  - Estructura modular: El conocimiento del SE debe ser organizado de tal forma que permita su fácil acceso y modificación.
  - Separar conocimiento de información: Un método consiste en colocar la información en bases de datos y escribir el conocimiento empleando reglas con variables.
- Sobre el software: Es importante considerar :

- Habilidades de programación: El personal que se encargará del mantenimiento debe tener pleno dominio de la herramienta con la cual fue desarrollado el SE
- Portabilidad del SE: La organización para la cual el SE fue construido puede hacer cambios en sus plataformas, en tal caso, el SE deberá ser actualizado.
- Utilitarios para hacer modificaciones.
- Acuerdo sobre el mantenimiento.

Con esta sección concluimos el presente capítulo, a través del cual se dio una revisión de los conceptos más importantes relacionados a los Sistemas Expertos. Habiendo presentado el dominio de aplicación y la técnica a empleada en este trabajo, es el momento de presentar el Sistema Experto propuesto y desarrollado para asistir a los productores de Michoacán.

### Sistema Experto para el Control de Plagas y Enfermedades

A continuación describimos en forma concisa el área en que el SE brindará apoyo a los productores de jitomate y aguacate de Michoacán. En adelante emplearemos el termino “los cultivos” para referirnos a los 2 cultivos mencionados.

#### 4.1 Conceptualización del Sistema Experto

Según el análisis de las necesidades de los productores del Estado de Michoacán se concluyó que el SE a desarrollarse debería brindar apoyo en:

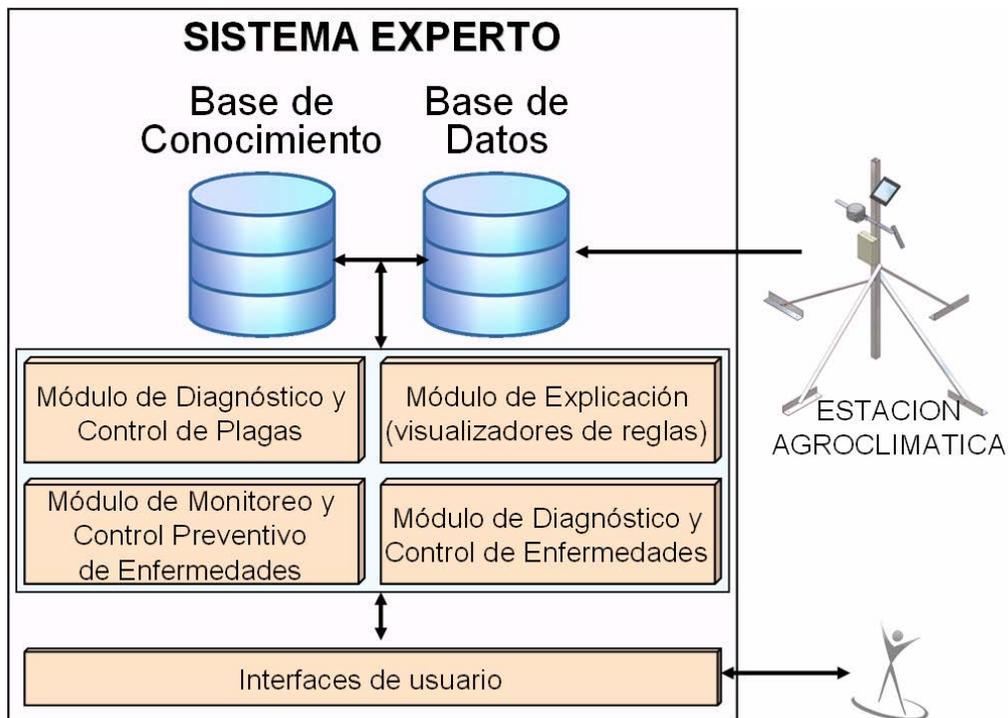
- Monitoreo permanente para alertar sobre condiciones propicias para el desarrollo de enfermedades.
- Análisis de la situación del cultivo (presencia de síntomas, condiciones climáticas, etc.) a fin de emitir diagnósticos y recomendaciones, tanto para enfermedades como para plagas, que permitan el control efectivo y eficaz del problema que presente el cultivo.

Para satisfacer estos requerimientos se subdividió la funcionalidad del SE en 3 módulos:

- Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.
- Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades.
- Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas.

Cada módulo consta de un conjunto de reglas cuyas estructuras están almacenadas en la base de conocimiento. Las reglas son alimentadas con los hechos que ingresa el usuario y con información proveniente de la base de datos. Asimismo, una estación agroclimática estará midiendo periódicamente ciertas variables climáticas, que son de vital importancia para el correcto funcionamiento del SE, como se verá más adelante.

En la figura 4.1 podemos apreciar un esquema de la arquitectura del SE desarrollado.



**Figura 4.1** Arquitectura del SE desarrollado para Michoacán

En la siguiente sección vamos a presentar, de forma general, aspectos relacionados al proceso de adquisición de conocimiento que fue llevado a cabo durante la realización del proyecto.

#### **4.2 Adquisición de conocimiento para el desarrollo del Sistema Experto**

Para la realización de este proyecto contamos con la participación de expertos del Estado de Michoacán. Entre los expertos contamos con la participación de fitopatólogos, entomólogos y técnicos que brindan asesoría en diversos municipios de Michoacán, entre los que podemos mencionar a Zamora, Saguayo, La Piedad, entre otros.

La primera fase dentro de este proceso de adquisición de conocimiento consistió en la revisión de bibliografía de diversas fuentes (revistas, libros, páginas web, etc). Este fue el primer paso para familiarizarse con el dominio, previo a las sesiones de trabajo con los expertos. A pesar que la información recolectada procedía de diversos lugares, y cada lugar tiene sus particularidades, se logró aprender diversos conceptos e ideas que permitieron una comunicación efectiva con los expertos desde el inicio del proyecto.

Durante las primeras sesiones de trabajo percibimos una sensación de poca predisposición al momento de querer profundizar en detalles acerca de la forma como ellos llevan a cabo sus labores. Probablemente, esto surgió por la percepción por parte de ellos, que el Sistema Experto a construirse podría eventualmente reemplazarlos o restarles oportunidades de trabajo. Sin embargo, con el transcurrir del tiempo, logramos la participación de todos gracias a una serie de estrategias como por ejemplo:

- Hacerles sentir confianza en el SE, el cual no iba a reemplazarlos, sino a apoyarlos para que realicen mejor su trabajo y que el productor mejore la productividad de sus cultivos.
- Hacerlos sentir parte del equipo de desarrollo y que los buenos resultados obtenidos en el producto final iban a reflejar su calidad profesional, lo cual revaloriza su trabajo.
- Hacerles ver que los buenos resultados de este proyecto, podrían brindarles la posibilidad de ser asesores en futuros proyectos, no solo en el Estado de Michoacán, sino también en otros estados del país.
- Mentalizarlos en que habían varias Fundaciones PRODUCE e instituciones como INIFAP, SAGARPA, etc. que estaban enteradas de la realización de este proyecto y la expectativa iba creciendo.

Es así como logramos la participación espontánea y abierta de los diversos expertos y el proyecto siguió su marcha.

Por otro lado, también existieron otro tipo de obstáculos ya no relacionados a la voluntad y entrega de los expertos, sino a otros factores, entre los que podemos mencionar:

- Diferencia de criterios al momento de resolver un problema, llegando al caso de darse contradicciones.
- No disponer de los expertos a tiempo completo, dado que cada uno tiene diferentes responsabilidades y se encuentran en diversos municipios del Estado de Michoacán.
- Rehacer modelos, gracias a la inclusión de factores que antes no fueron considerados o a la eliminación de factores que posteriormente fueron descartados. Esto conllevó en muchas ocasiones a rehacer el código que había sido programado y probado.

La forma de trabajo consistió en sesiones de trabajo (donde se realizaron entrevistas y discusiones de trabajo) con los expertos de hasta 8 horas, durante las cuales se definieron los elementos importantes del dominio y su interacción, con todo ello se planteó modelos y posteriormente formatos para capturar toda la información relevante. A medida que se iba avanzando en la adquisición del conocimiento, también se iban programando prototipos para ser mostrados a los expertos en la siguiente sesión de trabajo. Así, los expertos iban observando como el SE iba tomando forma y quedaban más convencidos de lo interesante y útil que sería el producto final.

En los siguientes puntos describimos cada módulo del Sistema Experto, presentando las diversas fases que se llevaron a cabo durante el desarrollo del mismo.

### **4.3 Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades**

El objetivo de este módulo es alertar al productor sobre la presencia de condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades en el cultivo y emitir las medidas de control según sea el caso. Para ello, se requiere que el SE esté monitoreando permanentemente los elementos importantes que determinan la presencia de una enfermedad.

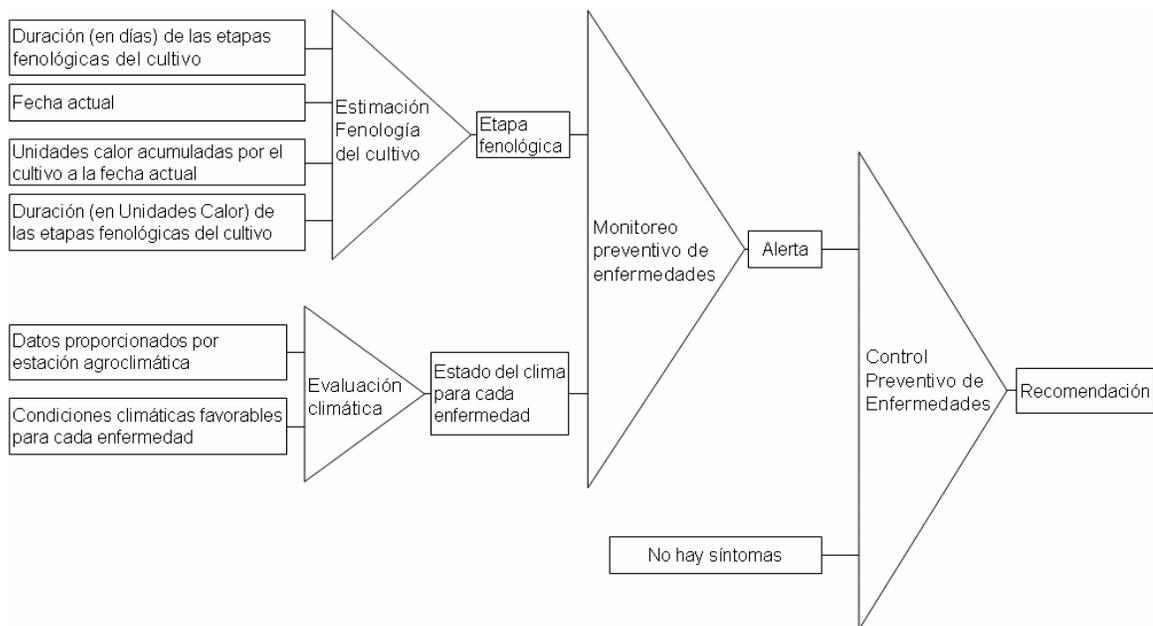
Se realizaron 8 sesiones, entre reuniones y entrevistas, con personal experto en el manejo de los cultivos con el fin de recolectar todo el conocimiento experto necesario para implementar la base de conocimiento correspondiente a este módulo. Las actividades estuvieron encaminadas a:

- Definir las enfermedades que el SE debería de monitorear. Dichas enfermedades son las mismas a considerar para el Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades.
- Identificar los elementos necesarios para que el SE pueda cumplir con la funcionalidad pretendida.
- Definir el mapa de dependencia para el Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.
- Definir las variables y sus respectivos valores para cada elemento del mapa de dependencia.

Para que el SE sea capaz de emitir alertas sobre la presencia de condiciones que favorecen el desarrollo de enfermedades es necesario considerar:

- Monitoreo constante de las condiciones climáticas.
- Rangos (por cada variable climática) que favorecen el desarrollo de enfermedades.
- Etapa fenológica del cultivo.

Después de que el SE emite una alerta, el productor debe realizar una inspección al campo tras la cual deberá alimentar al SE con los resultados que encontró. Si el cultivo no presenta síntoma alguno el SE debe brindar una recomendación de carácter preventivo. Todos estos elementos se interrelacionan según el mapa de dependencia mostrado en la figura 4.2.



**Figura 4.2** Mapa de dependencia para el Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.

#### 4.3.1 Adquisición de Conocimiento para la Estimación de la Fenología del Cultivo

Para mantener un registro de todo el conocimiento recopilado fue necesario definir una serie de formatos. Dichos formatos se elaboraron con la participación de los expertos.

La estimación de la fenología del cultivo viene dada por 2 métodos, como se describió en el capítulo 3. Para ello es necesario conocer la duración en días y en unidades calor de las etapas fenológicas del cultivo. Para tal efecto se diseñó el formato mostrado en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Formato de registro de duración, en días y unidades calor, de las etapas fenológicas de un cultivo.

REGISTRO DE DURACION DE LAS ETAPAS FENOLOGICAS		
Cultivo: _____		Fecha: _____
Expertos: _____		
Etapa fenológica	Duración	
	Número de días	Unidades Calor
Etapa <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>
...	...	...
Etapa <sub>m</sub>	X <sub>m</sub>	Y <sub>m</sub>

#### 4.3.2 Diseño de la Estimación de la Fenología del Cultivo

A partir de la tabla 4.1 se procedió a construir las reglas para estimar la fenología del cultivo. Las reglas para el sub-módulo de estimación de la fenología por días transcurridos tienen la siguiente estructura:

**SI** FechaActual  $\geq$  Fecha<sub>1</sub> **y** FechaActual  $\leq$  Fecha<sub>2</sub> **ENTONCES** CultivoEnEtapa<sub>1</sub>

Donde Fecha<sub>1</sub> y Fecha<sub>2</sub> son fechas calculadas a partir de la fecha de inicio del cultivo, tomando en consideración los valores registrados en la tabla 4.1.

Las reglas para el sub-módulo de estimación por unidades calor acumuladas tienen la siguiente estructura:

**SI** UC\_Acum  $\geq$  UC<sub>1</sub> **y** UC\_Acum  $\leq$  UC<sub>2</sub> **ENTONCES** CultivoEnEtapa<sub>1</sub>

De igual forma, UC<sub>1</sub> y UC<sub>2</sub> (rangos de unidades calor acumuladas) son calculados a partir de los valores registrados en la tabla 4.1. Mientras que las Unidades Calor acumuladas del cultivo son calculadas diariamente desde el inicio del cultivo, basándose en los datos proporcionados por la estación agroclimática.

A modo de ilustrar el proceso descrito, presentamos un ejemplo basado en el SE desarrollado.

En la tabla 4.2 se muestran la duración de las etapas fenológicas para el jitomate.

**Tabla 4.2** Duración, en días y en unidades calor, de las etapas fenológicas del jitomate

Etapa fenológica	Duración	
	Número de días	Unidades Calor
Desarrollo	20	310
Floración	30	270
Fructificación	30	300

Considerando que la fecha de inicio del cultivo es el 1 de marzo de 2007, las reglas para estimar la fenología basándonos en el número de días transcurridos son:

**SI** FechaActual  $\geq$  01/03/2007 y FechaActual  $\leq$  21/03/2007

**ENTONCES** El cultivo está en etapa de Desarrollo

**SI** FechaActual  $\geq$  22/03/2007 y FechaActual  $\leq$  20/04/2007

**ENTONCES** El cultivo está en etapa de Floración

**SI** FechaActual  $\geq$  21/04/2007 y FechaActual  $\leq$  21/05/2007

**ENTONCES** El cultivo está en etapa de Fructificación

Mientras que las reglas para estimar la fenología basándonos en las unidades calor acumuladas son:

**SI** UnidadesCalorAcumulas  $>$  0 y UnidadesCalorAcumulas  $\leq$  310

**ENTONCES** El cultivo está en etapa de Desarrollo

**SI** UnidadesCalorAcumulas  $>$  310 y UnidadesCalorAcumulas  $\leq$  580

**ENTONCES** El cultivo está en etapa de Floración

**SI** UnidadesCalorAcumulas  $>$  580 y UnidadesCalorAcumulas  $\leq$  880

**ENTONCES** El cultivo está en etapa de Fructificación

### 4.3.3 Adquisición de Conocimiento para la Evaluación del Clima

Para la evaluación del clima es necesario conocer los rangos de las variables climáticas que son favorables para el desarrollo de las enfermedades. Para tal efecto, se diseñó el formato mostrado en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3** Formato de registro de condiciones climáticas favorables para el desarrollo de enfermedades de un cultivo.

REGISTRO DE CONDICIONES CLIMATICAS FAVORABLES PARA EL DESARROLLO DE ENFERMEDADES			
Cultivo: _____		Fecha: _____	
Expertos: _____			
Enfermedad	Temperatura	Humedad	Número de horas que deben mantenerse las condiciones
Enf <sub>1</sub>	RangoTemp <sub>1</sub>	RangoHum <sub>1</sub>	NroHrs <sub>1</sub>
Enf <sub>2</sub>	RangoTemp <sub>2</sub>	RangoHum <sub>2</sub>	NroHrs <sub>2</sub>
...	...	...	...
Enf <sub>m</sub>	RangoTemp <sub>m</sub>	RangoHum <sub>m</sub>	NroHrs <sub>m</sub>

### 4.3.4 Diseño de la Evaluación del Clima

A partir de la tabla 4.3 se construyeron las reglas para determinar si el clima era favorable o no a las distintas enfermedades. Dichas reglas tienen la siguiente estructura:

**SI** Temperatura está dentro RangoTemp<sub>1</sub> y Humedad está dentro RangoHum<sub>1</sub> durante NroHrs<sub>1</sub> horas **ENTONCES** ClimaFavorable\_Enf<sub>1</sub>

A continuación presentamos un ejemplo tomado del SE desarrollado, mediante el cual vamos a ilustrar el proceso descrito previamente.

En la tabla 4.4 se muestran los rangos de temperatura y humedad, así como el número de horas que se requiere que estas variables climáticas permanezcan dentro de dichos rangos para que dos enfermedades del jitomate puedan desarrollarse, en este caso Tizón Tardío y Moho Gris.

**Tabla 4.4** Condiciones climáticas favorables para el desarrollo de enfermedades del jitomate.

Enfermedad	Temperatura	Humedad	Número de horas que deben mantenerse las condiciones
Tizón Tardío	[12,22]	[80,100]	4
Moho Gris	[17,23]	[80,95]	6

A partir de la información mostrada en la tabla 4.4, procedemos a construir las reglas para evaluar el clima, las cuales son:

**SI**

- Temperatura está dentro de los 12 °C y 22°C Y
- Humedad está dentro del 80%-100% Y
- Estas condiciones se han mantenido durante 4 horas continuas

**ENTONCES**

Clima es Favorable para Tizón Tardío

**SI**

- Temperatura está dentro de los 17 °C y 23°C Y
- Humedad está dentro del 80%-95% Y
- Estas condiciones se han mantenido durante 6 horas continuas

**ENTONCES**

Clima es Favorable para Moho Gris

#### **4.3.5 Adquisición de Conocimiento para el Monitoreo Preventivo de Enfermedades**

Como vimos en el mapa de dependencia de la figura 4.2, el monitoreo depende de las condiciones climáticas y la etapa fenológica del cultivo. Para recopilar dicha información, se diseñó el formato mostrado en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Formato de registro de variables evaluadas durante el Monitoreo Preventivo de Enfermedades.

VARIABLES EVALUDAS DURANTE EL MONITOREO		
Cultivo: _____	Fecha: _____	
Expertos: _____	_____	
Condiciones climáticas	Etapa fenológica	Monitoreo
ClimaFavorable_Enf <sub>1</sub>	Etapa <sub>1</sub>	AlertaEnf <sub>1</sub>
...	...	...

#### 4.3.6 Diseño del Monitoreo Preventivo de Enfermedades

A partir de la tabla 4.5 se construyeron las reglas para determinar si las condiciones, considerando el clima y etapa fenológica, eran favorables para el desarrollo de enfermedades. Dichas reglas tienen la siguiente estructura:

**SI** ClimaFavorable\_Enf<sub>1</sub> y Cultivo\_en\_Etapa<sub>1</sub> **ENTONCES** AlertaEnf<sub>1</sub>

Para ilustrar el proceso descrito, presentamos un ejemplo tomado del SE desarrollado.

En la tabla 4.6 se muestran los elementos necesarios para disparar una alerta de enfermedades, en este caso Tizón Tardío y Moho Gris.

**Tabla 4.6** Condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades del jitomate.

Condiciones climáticas	Etapa fenológica	Monitoreo
Favorables para Tizón Tardío	Cualquier etapa	Alerta de Tizón Tardío
Favorables para Moho Gris	Floración, Fructificación	Alerta de Moho Gris

Considerando las enfermedades de la tabla 4.6, las reglas para el monitoreo son:

**SI**

- Condiciones climáticas son favorables para Tizón Tardío

**ENTONCES**

Emitir alerta contra Tizón Tardío

En el caso de regla vista previamente, se puede obviar evaluar la etapa fenológica dado que Tizón Tardío es una enfermedad que puede atacar en cualquier etapa del cultivo, lo cual no ocurre con Moho Gris, como vemos en a continuación.

**SI**

- Condiciones climáticas son favorables para Moho Gris **Y**
- (El cultivo se encuentra en floración **O**
- El cultivo se encuentra en fructificación)

**ENTONCES**

Emitir alerta contra Moho Gris

**4.3.7 Adquisición de Conocimiento para el Control Preventivo de Enfermedades**

Luego de haberse emitido una alerta, el productor debe ir a inspeccionar el campo. En caso no haya encontrado síntomas de daño alguno, deberá tomar alguna medida de prevención, la cual será dada por el SE. Para recopilar la información necesaria, se diseñó el formato mostrado en la tabla 4.7

**Tabla 4.7** Formato de registro de recomendaciones de control preventivo de enfermedades de un cultivo.

CONTROL PREVENTIVO DE ENFERMEDADES		
Cultivo: _____	Fecha: _____	
Expertos: _____		
Monitoreo	Resultado de inspección	Recomendación
AlertaEnf <sub>1</sub>	No hay presencia de síntomas	Rec <sub>1</sub>
...	...	...

**4.3.8 Diseño del Control Preventivo de Enfermedades**

La información recopilada en la tabla 4.7 se empleó para la construcción de reglas, cuya estructura es la siguiente:

**SI** AlertaEnf<sub>1</sub> y No hay presencia de síntomas **ENTONCES** Rec<sub>1</sub>

Para ilustrar el proceso descrito, presentamos un ejemplo tomado del SE desarrollado. En la tabla 4.8 se muestra una recomendación preventiva contra Tizón Tardío, a la cual arribará el SE tras haberse disparado una alerta contra dicha enfermedad y aun no haberse encontrado síntomas en el cultivo.

**Tabla 4.8** Recomendación de control preventivo contra Tizón Tardío.

Monitoreo	Resultado de inspección	Recomendación
Alerta de Tizón Tardío	No hay presencia de síntomas	Aplicar alguno de los siguientes productos: - Manzate DF (1.5 - 3 kg/Ha) - Dithane (1.5 - 3 kg/Ha) - Daconil 2787 W75% (1.5 - 2.5 kg/Ha) Hacer una aplicación hoy y volver a revisar en 3 días.

La regla de control preventivo es:

**SI**

- Hay alerta de Tizón Tardío      Y
- No hay presencia de síntomas

**ENTONCES**

Aplicar alguno de los siguientes productos:

- Manzate DF (1.5 - 3 kg/Ha)
- Dithane (1.5 - 3 kg/Ha)
- Daconil 2787 W75% (1.5 - 2.5 kg/Ha)

Hacer una aplicación hoy y volver a revisar en 3 días.

Con esto concluye la explicación correspondiente al primer módulo del SE, que es el Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.

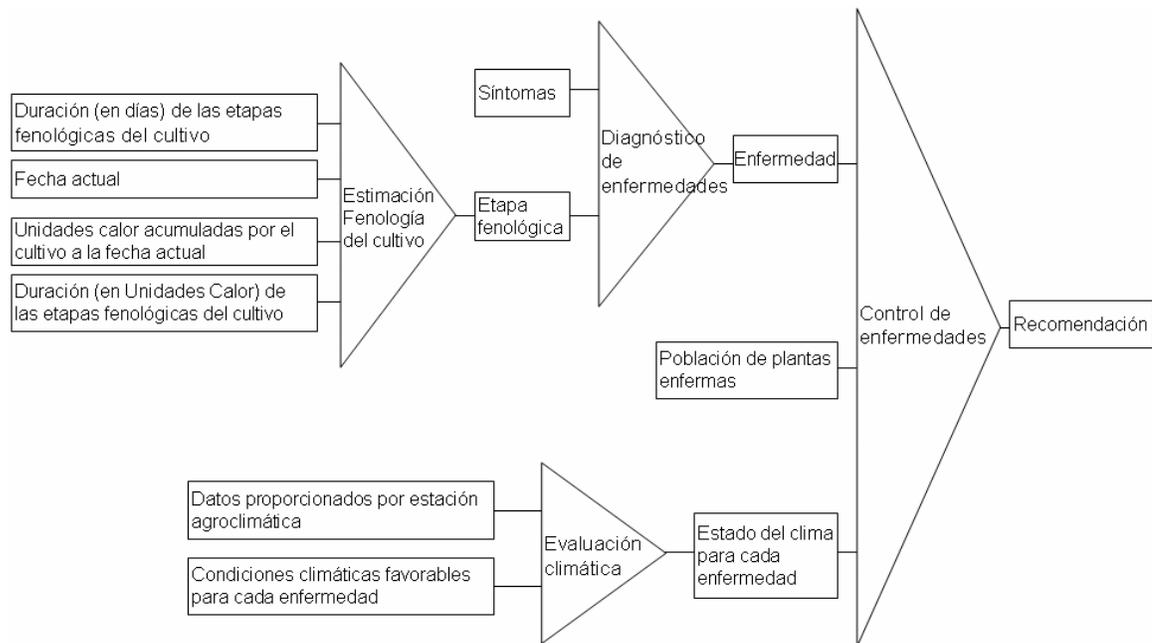
**4.4 Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades**

El objetivo de este módulo es analizar la situación del cultivo tras haberse registrado síntomas durante las inspecciones de campo, para luego emitir un diagnóstico junto con su respectiva recomendación.

En la fase de adquisición de conocimiento se realizaron 12 sesiones, cuyas actividades estuvieron encaminadas a:

- Recolectar síntomas causados por la presencia de las diversas enfermedades que atacan a los cultivos.
- Recolectar fotografías que estén asociadas a los diversos síntomas, lo cual va a facilitar la identificación de los síntomas respectivos.
- Definir factores a considerar en la emisión de las recomendaciones de control de las diversas enfermedades.

En la figura 4.3 se muestra el mapa de dependencia para este módulo.



**Figura 4.3** Mapa de dependencia para el Diagnóstico y Control de Enfermedades.

Según se aprecia en la figura 4.3, el control de enfermedades dependerá de 3 puntos fundamentales:

- La enfermedad que está atacando el cultivo. Para determinar la enfermedad es necesario efectuar un diagnóstico, para lo cual se requiere considerar los síntomas que presenta el

- cultivo, así como la etapa fenológica del mismo. Esta última dependerá de calcular los días transcurridos desde el inicio el cultivo o de las unidades calor acumuladas a la fecha.
- La población de plantas que están enfermas. Para determinar dicha población será necesario realizar inspecciones al cultivo.
  - Estado del clima para enfermedad: Dependerá del monitoreo permanente de las variables climáticas, que son medidas por la estación agroclimática.

#### 4.4.1 Adquisición de Conocimiento para el Diagnóstico de Enfermedad

Habiendo establecido los elementos claves para realizar un diagnóstico, síntomas y etapa fenológica del cultivo, procedimos a la recolección de datos específicos, los cuales nos sirvieron para construir las reglas. Para tal efecto, se elaboró el formato que se muestra en la tabla 4.9.

**Tabla 4.9** Formato de registro de síntomas para cada enfermedad según la parte de la planta donde se presenta el síntoma.

REGISTRO DE SINTOMAS DE ENFERMEDADES					
Cultivo: _____			Fecha: _____		
Expertos: _____					
Enfermedad	Raíz	Tallo	Hojas	Flor	Fruto
Enf <sub>1</sub>	Síntoma <sub>1</sub> Síntoma <sub>2</sub>	...	...	...	...
Enf <sub>2</sub>	Síntoma <sub>3</sub>	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
Enf <sub>m</sub>	Síntoma <sub>7</sub>	...	...	...	Síntoma <sub>n</sub>

#### 4.4.2 Diseño del Diagnóstico de Enfermedad

El siguiente paso fue la elaboración de las reglas. Para esto se procedió a elaborar un registro único de síntomas donde a cada síntoma le fue asignado un código. Dado que existen enfermedades que presentan síntomas comunes era indispensable identificar cuales eran estos para evitar la redundancia. En la tabla 4.10 se presenta el formato de dicho registro.

**Tabla 4.10** Formato de registro único de síntomas de enfermedades para cada cultivo.

REGISTRO UNICO DE SINTOMAS DE ENFERMEDADES	
Cultivo: _____ Fecha: _____	
Expertos: _____	
Código	Síntoma
S1	Síntoma 1
S2	Síntoma 2
S3	Síntoma 3
S4	Síntoma 4
S5	Síntoma 5
...	...
SN	Síntoma N

Teniendo ya los síntomas identificados por un código único se procedió a crear la matriz de correspondencia Síntoma/Enfermedad mostrada en la tabla 4.11.

**Tabla 4.11** Matriz de correspondencia Síntomas/Enfermedades para cada cultivo.

Síntoma											Enfermedad
1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	N	
X	X	X	X								Enf <sub>1</sub>
				X	X		X				Enf <sub>2</sub>
						X		X			Enf <sub>3</sub>
		X		X				X			...
							X				Enf <sub>m</sub>

La etapa fenológica del cultivo constituye un elemento fundamental para la presencia de enfermedades, por lo tanto fue añadida una columna a la tabla 4.11, dando lugar a la tabla 4.12, la cual sirvió para definir las reglas para diagnosticar enfermedades.

**Tabla 4.12** Matriz de correspondencia Síntomas/Etapa Fenológica para diagnosticar enfermedades de un cultivo.

Síntomas											Etapa Fenológica	Diagnóstico de Enfermedad
1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	N		
X	X		X							X	Etapa <sub>1</sub>	Enf <sub>1</sub>
				X	X						Etapa <sub>3</sub>	Enf <sub>2</sub>
						X		X			Etapa <sub>2</sub>	Enf <sub>3</sub>
											...	...
		X					X				Etapa <sub>1</sub> , Etapa <sub>2</sub>	Enf <sub>m</sub>

A partir de la tabla 4.10, se procedió a la elaboración de reglas, las cuales tienen la siguiente estructura:

**SI** ((S<sub>1</sub> o S<sub>2</sub> o S<sub>4</sub> o ... S<sub>n</sub>) y Etapa<sub>1</sub>) **ENTONCES** Enf<sub>1</sub>

A continuación ilustramos el proceso descrito mediante un ejemplo. La tabla 4.13 muestra parcialmente el registro único de síntomas de enfermedades para el jitomate.

**Tabla 4.13** Registro único de síntomas de enfermedades del jitomate.

Código	Síntoma
S01	Lesiones grandes, irregulares y acuosas en el tallo.
S02	Manchas café oscuro a negro.
S03	Anillos concéntricos o manchas necroticas.
S04	Lesión hendida, elíptica, acuosa, de color gris.
S05	Lesiones necróticas e irregulares.
S06	El tejido del tallo a nivel del suelo se vuelve blando y acuoso, con estrangulamiento.
S07	Pustulas negras o pardas abultadas.
S08	Pequeñas manchas negras de 1 a 2 mm diámetro rodeadas de una aureola amarilla.
S09	Lesiones grandes, irregulares y acuosas en las hojas.
S10	Lesiones grandes de color castaño con la consistencia de papel.
S11	Lesiones en la cara inferior de las hojas que pueden o no presentar un fino algodoncillo blanco-grisáceo.
S12	Tienen manchas en las hojas más viejas con áreas necróticas circulares o angulosas de color café oscuro; formando anillos concéntricos.
S13	Amarillamiento completo.
S14	Motas circulares de color café a negro de 1-2mm, en cuyo centro pueden presentar una mancha gris rodeada de una aureola amarilla.
S15	Agujeros en la hoja.
S16	En los folíolos hay manchas grandes, apergaminadas, circulares o en forma de llama.
S17	Manchas verde-amarillentas.
S18	Micelio fino y polvoriento en el envés, que le da a éstas un aspecto blanco o púrpura.
S19	Manchas pequeñas, oscuras, acuosas, rodeadas de un halo amarillento.
S20	Pequeñas manchas negras de 1 a 2 mm diámetro rodeadas de una aureola amarilla.
S21	Destrucción de tejidos foliares.
S22	Amarillamiento paulatino del racimo floral.
S23	Necrosis de flor.
S24	Pequeñas manchas necróticas en la flor o en el pedúnculo.
S25	Lesiones firmes de color pardo-verdoso y de bordes irregulares, cuya superficie tiene una apariencia grasosa y áspera.
S26	Lesiones oscuras hundidas en la zona donde se inserta el pedúnculo.

Luego de tener el registro único de síntomas se procede a elaborar la matriz de correspondencia, como se ilustra en la tabla 4.14

**Tabla 4.14** Matriz de correspondencia Síntomas/Enfermedades para el jitomate.

Síntoma																				Enfermedad
1	2	3	...	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...	24	25		
X					X	X	X											X	TZTD	
										X	X								MAGR	
													X	X					CENI	

En la tabla 4.15 presentamos la nueva matriz de correspondencia con los elementos necesarios, síntomas y etapa fenológica, para diagnosticar la enfermedad que está atacando un cultivo.

**Tabla 4.15** Matriz de correspondencia Síntomas/Etapa Fenológica para diagnosticar algunas enfermedades del jitomate.

Síntoma																				Etapa Fenológica	Diag. Enf.
1	2	3	...	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...	24	25			
X					X	X	X											X	Cualquiera	TZTD	
										X	X								Floración, Fructificación	MAGR	
													X	X					Floración, Fructificación	CENI	

Por ultimo, veamos algunas reglas procedentes de la tabla 4.15

**SI**

- Hay lesiones grandes, irregulares y acuosas en el tallo **O**
- Hay lesiones grandes, irregulares y acuosas en las hojas **O**
- Hay lesiones grandes de color castaño con la consistencia de papel en las hojas **O**
- Hay lesiones en la cara inferior de las hojas que pueden o no presentar un fino algodoncillo blanco-grisáceo **O**
- Hay lesiones firmes en el fruto de color pardo-verdoso y de bordes irregulares, cuya superficie tiene una apariencia grasosa y áspera.

**ENTONCES**

El cultivo está siendo atacado por TIZON TARDIO

**SI**

- ( - En la hoja hay motas circulares de color café a negro de 1-2mm, en cuyo centro pueden presentar una mancha gris rodeada de una aureola amarilla. **O**
- Hay agujeros en la hoja.
- )

**Y**

- ( El cultivo está en etapa de Floración **O**
- El cultivo está en etapa de Fructificación
- )

**ENTONCES**

El cultivo está siendo atacado por MANCHA GRIS

#### 4.4.3 Adquisición de Conocimiento para el Control de Enfermedades

Para controlar de enfermedades se requiere determinar la recomendación apropiada, esto es, el o los productos con las dosis apropiadas y sus respectivas indicaciones. Como vimos en la figura 4.3, son 3 los elementos a considerar en la emisión de una recomendación:

- La enfermedad que está atacando el cultivo.
- El tamaño de la población de plantas enfermas.
- Estado del clima para enfermedad.

En la tabla 4.16 se muestra el formato respectivo para recolectar información.

**Tabla 4.16** Formato para registrar recomendaciones para enfermedades de cultivos.

REGISTRO DE RECOMENDACIONES PARA ENFERMEDADES			
Cultivo: _____		Fecha: _____	
Expertos: _____			
Enfermedad	Número de plantas con síntomas	Condiciones climáticas	Recomendación
Enf <sub>1</sub>	$X_1 - X_2$	Favorable	Rec <sub>1</sub>
	$> X_2$	No_Favorable	Rec <sub>2</sub>
Enf <sub>2</sub>			
...	...	...	...
Enf <sub>m</sub>			Rec <sub>n</sub>

#### 4.4.4 Diseño del Control de Enfermedades

A partir de la tabla 4.16, se procedió a la elaboración de reglas, las cuales tienen la siguiente estructura:

**SI**  $Enf_1$  y  $NroPlantasEnf_1 \geq X_1$  y  $NroPlantasEnf_1 \leq X_2$  y  $ClimaFavorable$   
**ENTONCES**  $Rec_1$

**SI**  $Enf_1$  y  $NroPlantasEnf_1 > X_2$  y  $ClimaNoFavorable$  **ENTONCES**  $Rec_2$

A modo de ilustración presentamos el siguiente ejemplo

**Tabla 4.17** Registro de recomendaciones para Tizón Tardío en cultivos de jitomate.

Enfermedad	Número de plantas con síntomas	Condiciones climáticas	Recomendación (Ingrediente Activo, Producto, Dosis, Indicación)
Tizón Tardío	$\geq 1$	Favorable	Cimoxamil, Strike 80, 2.5-3kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 7 días. Metalaxil, Ridomil Gold, 2-2.5 kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 7 días.
	$\geq 1$	No Favorable	Mancozeb, Dithane, 1.5 - 3 kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 8-10 días. Chlorothalonil, Trevanil 75, 1.5 - 2.5 kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 8 días.

Las reglas que podemos extraer de la tabla 4.17 son:

#### **SI**

- La enfermedad es TIZON TARDIO **Y**
- El número de plantas es mayor o igual que 1 **Y**
- Las condiciones climáticas son favorables para TIZON TARDIO.

#### **ENTONCES**

Se recomienda aplicar alguno de los siguientes productos:

- Cimoxamil, Strike 80, 2.5-3kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 7 días.
- Metalaxil, Ridomil Gold, 2-2.5 kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 7 días.

## **SI**

- La enfermedad es TIZON TARDIO **Y**
- El número de plantas es mayor o igual que 1 **Y**
- Las condiciones climáticas no son favorables para TIZON TARDIO.

## **ENTONCES**

Se recomienda aplicar alguno de los siguientes productos:

- Mancozeb, Dithane, 1.5 - 3 kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 8-10 días.
- Chlorothalonil, Trevanil 75, 1.5 - 2.5 kg/Ha, Hacer una aplicación y revisar en 8 días.

Con esto concluye la explicación correspondiente al desarrollo del Módulo de Control y Diagnóstico de Enfermedades.

### **4.5 Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas**

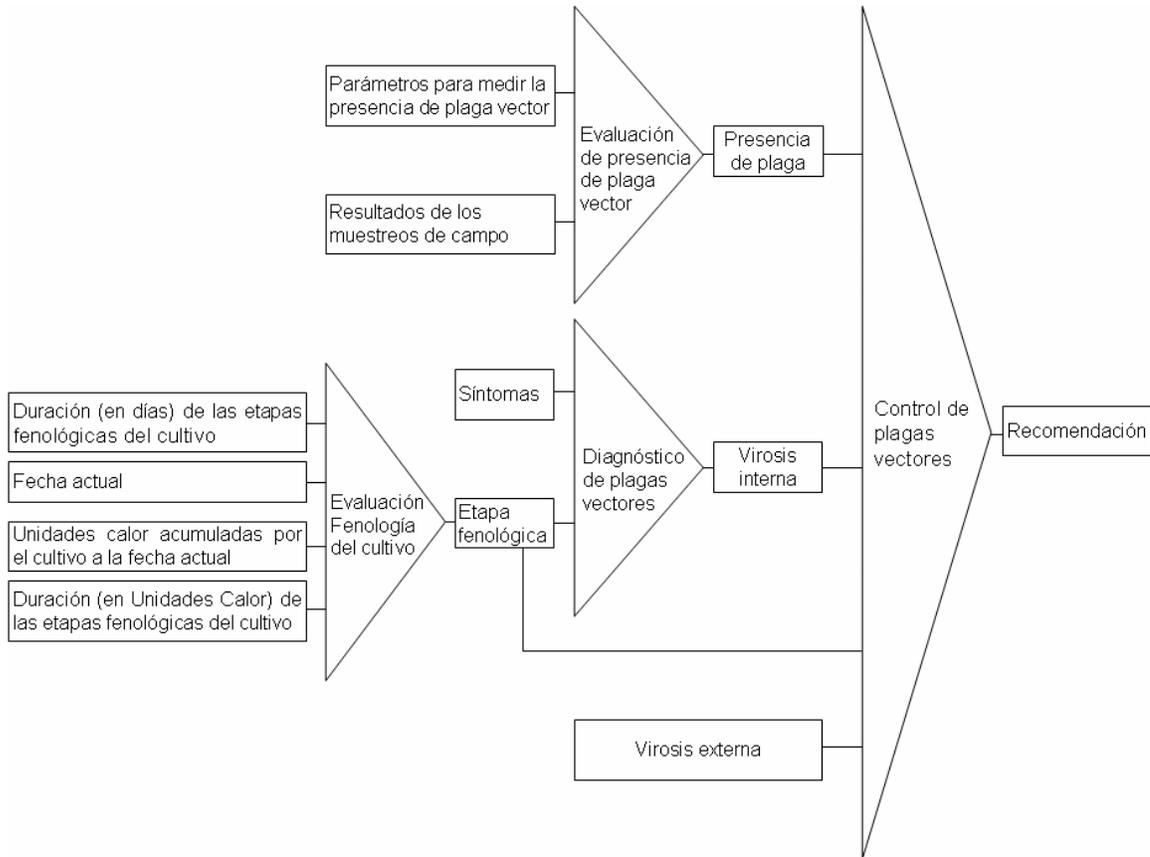
El objetivo de este módulo es contrarrestar los daños causados por plagas, vectores y no vectores, para lo cual se requiere evaluar los síntomas y otros elementos que ayudarán a determinar la mejor recomendación según sea el caso.

Durante la fase de adquisición de conocimiento para implementar este módulo se realizaron 16 sesiones, cuyas actividades estuvieron encaminadas a:

- Definir las plagas, vectores y no vectores, que serían consideradas en el SE.
- Recolectar síntomas causados por la presencia de las diversas plagas que atacan a los cultivos.
- Definir factores a considerar en la emisión de las recomendaciones de control de las diversas plagas.
- Recolectar fotografías asociadas a los diversos síntomas.
- Recolectar fotografías de las diversas plagas en sus estadios, lo cual sirvió para el muestreo poblacional de cada plaga.

En la figura 4.4 se muestra todos los elementos (y sus relaciones de dependencia) que forman parte del modelo de diagnóstico y control de plagas vectores. A continuación se analizará en detalle todos los elementos que conforman el mapa de dependencia, para luego presentar el mapa

de dependencia correspondiente al modelo de Control de Plagas No Vectores, así como su respectiva explicación.



**Figura 4.4** Mapa de dependencia para el Diagnóstico y Control de Plagas Vectores.

Como podemos ver en la figura 4.4, el Control de Plagas Vectores dependerá de 3 puntos fundamentales:

- La presencia de plaga: Se determinará mediante la realización de muestreos, contrastando estos resultados con los umbrales definidos por los expertos.
- La virosis interna que presenta el cultivo: Esto va de la mano con la plaga que está atacando, la cual será determinada a partir de los síntomas y la etapa fenológica del cultivo. Esta última dependerá de calcular los días transcurridos desde el inicio el cultivo o de las unidades calor acumuladas a la fecha.
- Virosis Externa: Indica si los cultivos vecinos presentan alguna virosis. Esta información será ingresada por el productor durante la sesión con el SE.

#### 4.5.1 Adquisición de Conocimiento para Evaluar Presencia de Plagas Vectores

La presencia de plaga puede ser de 2 tipos: presencia moderada y presencia crítica. Cada una está definida por rangos, cuyos valores pueden variar de una etapa fenológica a otra y tomando en cuenta también el estadio de la plaga. Toda esta información fue recopilada mediante el formato mostrado en la tabla 4.18.

**Tabla 4.18** Formato de registro de rangos moderados y críticos para evaluar la presencia de plagas vectores.

REGISTRO DE RANGOS MODERADOS/CRITICOS PARA EVALUAR PRESENCIA DE PLAGAS VECTORES							
Cultivo: _____				Fecha: _____			
Expertos: _____							
Plaga	Estadio	Etapa fenológica					
		Etapa <sub>1</sub>		...		Etapa <sub>z</sub>	
		Presencia moderada	Presencia crítica			Presencia Moderada	Presencia crítica
Plaga <sub>1</sub>	Estadio <sub>1</sub>	X <sub>1</sub> -X <sub>2</sub>	>X <sub>2</sub>			X <sub>r-1</sub> -X <sub>r</sub>	>X <sub>r</sub>
	...	...	...			...	...
	Estadio <sub>n</sub>	...	...			...	...
Plaga <sub>2</sub>	...	...	...			...	...
...	...	...	...			...	...
Plaga <sub>m</sub>	...	...	...			...	...

#### 4.5.2 Diseño de la Evaluación de Presencia de Plagas Vectores

A partir del conocimiento recopilado en la tabla 4.18 se procedió a la elaboración de reglas, cuya estructura es la siguiente:

**SI** Cantidad\_Plaga<sub>1</sub>\_Estadio<sub>1</sub> está en el intervalo X<sub>1</sub>-X<sub>2</sub> y Cultivo\_en\_Etapa<sub>1</sub>  
**ENTONCES** Presencia\_Moderada

A modo de ilustración presentamos un ejemplo. La tabla 4.19 corresponde a los rangos moderados y críticos para 3 plagas vectores del jitomate.

**Tabla 4.19** Rangos moderados y críticos para evaluar la presencia de plagas vectores en jitomate.

Plaga	Estadio	Etapa fenológica					
		Desarrollo		Floración		Fructificación	
		Presencia moderada	Presencia Crítica	Presencia moderada	Presencia Crítica	Presencia moderada	Presencia crítica
Mosca Blanca	Adultos	1-10	>10	11-50	>50	51-70	>70
Trips	Adultos	5-10	>10	20-50	>50	-	-
Chicharritas	Adultos	5-20	>20	30-50	>50	-	-

Entre algunas de las reglas que podemos extraer de la tabla 4.19 tenemos:

**SI**

- La Etapa Fenológica del cultivo es Desarrollo **Y**
- El número de Adultos de Mosca Blanca es de 1 a 10

**ENTONCES**

- Hay Presencia Moderada de Mosca Blanca

**SI**

- La Etapa Fenológica del cultivo es Desarrollo **Y**
- El Número de Adultos de Trips es mayor que 50

**ENTONCES**

- Hay Presencia Moderada de Mosca Blanca

A continuación explicamos como se desarrollo el sub-módulo del diagnostico de plagas vectores.

**4.5.3 Adquisición de Conocimiento para el Diagnóstico de Plaga Vector**

El diagnostico de plaga vector buscar identificar la virosis que presenta el cultivo. Para esto, es necesario analizar los síntomas y la etapa fenológica del cultivo. Para tal efecto, se elaboró el formato presentado en la tabla 4.20, el cual sirvió para la recolección de síntomas.

**Tabla 4.20** Formato de registro de síntomas de plagas según la parte de la planta donde se presenta el síntoma.

REGISTRO DE SINTOMAS DE PLAGAS VECTORES					
Cultivo: _____			Fecha: _____		
Expertos: _____					
Plaga	Raíz	Tallo	Hojas	Flor	Fruto
Plaga <sub>1</sub>	Síntoma 1 Síntoma 2	...	...	...	...
Plaga <sub>2</sub>	Síntoma 3	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
Plaga <sub>m</sub>	Síntoma 7	...	...	...	Síntoma N

#### 4.5.4 Diseño del Diagnóstico de Plaga Vector

Tras la adquisición de conocimiento correspondiente, se procedió a la elaboración de las reglas. Para esto se construyó un registro único de síntomas donde le fue asignado un código a cada síntoma. Dado que existen plagas que presentan síntomas comunes era indispensable identificar cuales eran éstos para evitar la redundancia. La tabla 4.21 presenta el formato de dicho registro.

**Tabla 4.21** Formato de registro de único de síntomas de plagas para cada cultivo.

REGISTRO UNICO DE SINTOMAS DE PLAGAS	
Cultivo: _____ Fecha: _____	
Expertos: _____	
Código	Síntoma
S1	Síntoma 1
S2	Síntoma 2
S3	Síntoma 3
S4	Síntoma 4
S5	Síntoma 5
S6	Síntoma 6
...	...
SN	Síntoma N

Teniendo ya los síntomas identificados por un código único se procedió a crear la matriz de correspondencia Síntoma/Plaga mostrada en la tabla 4.22.

**Tabla 4.22** Matriz de correspondencia Síntomas/Plagas para cada cultivo.

Síntomas											Plaga
1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	N	
X	X	X	X								Plaga <sub>1</sub>
				X	X		X				Plaga <sub>2</sub>
						X		X			Plaga <sub>3</sub>
		X		X				X			...
							X				Plaga <sub>m</sub>

La etapa fenológica del cultivo constituye un elemento fundamental para la presencia de plagas, por lo tanto fue añadida una columna a la tabla 4.22, dando lugar a la tabla 4.23, la cual sirvió para definir las reglas para diagnosticar virosis.

**Tabla 4.23** Matriz de correspondencia Síntomas/Etapa Fenológica para diagnosticar la virosis causada por una plaga vector.

Síntomas											Etapa Fenológica	Diagnóstico Plaga
1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	N		
				X	X						Etapa <sub>3</sub>	Virosis_Plaga <sub>1</sub>
X			X							X	Etapa <sub>1</sub> , Etapa <sub>2</sub>	Virosis_Plaga <sub>2</sub>
		X				X		X			Etapa <sub>2</sub> , Etapa <sub>3</sub>	Virosis_Plaga <sub>3</sub>
											...	...
	X						X				Etapa <sub>2</sub>	Virosis_Plaga <sub>m</sub>

A partir de la tabla 4.23 se procedió a la elaboración de reglas, las cuales tienen la siguiente estructura:

**SI** ((S<sub>5</sub> o S<sub>6</sub>) y Etapa<sub>3</sub>) **ENTONCES** Virosis\_Plaga<sub>1</sub>

A continuación presentaremos un ejemplo para ilustrar el proceso descrito previamente. En la tabla 4.24 mostramos registro único de síntomas de plagas, vectores y no vectores, del jitomate. Cabe mencionar que esta forma de trabajar con los síntomas es común para plagas vectores y no vectores, la diferencia radica en la terminología empleada. Por ejemplo: Cuando diagnosticamos que un cultivo presenta síntomas de Mosca Blanca, plaga vector, diremos que el cultivo presenta “virosis de Mosca Blanca”, mientras que si el cultivo presenta síntomas de grillos, diremos que se detectó la presencia de “grillos”.

**Tabla 4.24** Registro único de síntomas de plagas, vectores y no vectores, del jitomate.

Código	Síntoma
PS01	Escasez de raíz
PS02	Raíces con nódulos o agallas.
PS03	Pubescencias de color bronceado en tallos
PS04	Entrenudos cortos.
PS05	Tonalidades amarillentas en el tallo
PS06	Presencia de salesilla en las hojas
PS07	Hojas enchinadas, encarrujadas hacia arriba.
PS08	Hojas amarillentas.
PS09	Hojas arrugadas
PS10	Hojas color verde intenso y quebradizas.
PS11	Yemas con deformaciones
PS12	Hojas con tonalidades doradas.
PS13	Hojas resecaándose, con coloración bronceada.
PS14	Hojas no crecen.
PS15	Hojas con galerías.
PS16	Hojas con lesiones.
PS17	Caída de hojas.
PS18	Hojas con tonalidades grisáceas.
PS19	Tonalidades amarillentas en las hojas
PS20	Hojas enchinadas, encarrujadas hacia abajo.
PS21	Hojas con mosaico.
PS22	Presencia de mielecilla en las hojas
PS23	Abortamiento de la flor
PS24	Falta de floración
PS25	Poca floración
PS26	Frutos de diversas coloraciones oscuras o rojizas en círculos concéntricos.
PS27	Frutos pequeños con deformaciones.
PS28	Muerte de la planta
PS29	Plantas con exceso de brotes de poco desarrollo.
PS30	Telaraña en la planta.
PS31	Planta con escasa ramificación
PS32	Falta de desarrollo de la planta
PS33	Color café oscuro en la planta.
PS34	Marchitamiento de la planta
PS35	Planta trozada en la corona
PS36	Plántulas trozadas.
PS37	Plantas pequeñas
PS38	Planta raquílica

En la tabla 4.25 presentamos la matriz de correspondencia Síntoma/Plaga para 2 plagas vectores del jitomate.

**Tabla 4.25** Matriz de correspondencia Síntoma/Plaga para Mosca Blanca y Trips.

Síntomas																					Plaga			
1	...	4	...	7	8	9	10	11	12	13	...	22	23	24	25	26	27	28	29	30		...	41	
		X		X	X	X									X				X				MOSB	
								X	X				X	X		X	X							TRIP

En la tabla 4.26 presentamos la matriz de correspondencia con los elementos necesarios, síntomas y etapa fenológica, para determinar la virosis que está atacando al cultivo.

**Tabla 4.26** Matriz de correspondencia Síntoma/Etapa Fenológica para diagnosticar virosis de Mosca Blanca y Trips.

Síntomas																					Etapa fenológica	Diagnóstico Plaga			
1	...	4	...	7	8	9	10	11	12	13	...	22	23	24	25	26	27	28	29	30			...	41	
		X		X	X	X									X				X					Cualquiera	Virosis MOSB
								X	X				X	X		X	X							Cualquiera	Virosis TRIP

A partir de la tabla 4.26 podemos construir las siguientes reglas para diagnosticar la virosis por Mosca Blanca o Trips en el cultivo.

**SI**

- Hay hojas amarillentas **O**
- Hay hojas arrugadas **O**
- Hay entrenudos cortos **O**
- Hay hojas enchinadas, encarrujadas hacia arriba **O**
- Hay poca floración **O**
- Hay plantas con exceso de brotes de poco desarrollo

**ENTONCES**

Hay virosis de Mosca Blanca en el cultivo

**SI**

- Hay yemas con deformaciones
- Hojas con tonalidades doradas
- Hay abortamiento de la flor
- Falta de floración
- Hay frutos de diversas coloraciones oscuras o rojizas en círculos concéntricos
- Frutos pequeños con deformaciones

**ENTONCES**

Hay virosis de Trips en el cultivo

**4.5.5 Adquisición de Conocimiento para el Control de Plagas Vectores**

Habiendo ya diagnosticado la virosis que presenta el cultivo, el siguiente paso es determinar la recomendación apropiada. Cada una está compuesta de los productos con las dosis apropiadas y sus respectivas indicaciones. Como vimos en la figura 4.4, son 3 los elementos a considerar en la emisión de una recomendación:

- La presencia de plaga.
- La virosis interna que presenta el cultivo.
- Virosis externa (virosis en cultivos vecinos).

En la tabla 4.27 se muestra el formato respectivo para recolectar información.

**Tabla 4.27** Formato para registrar recomendaciones para plagas vectores de cultivos.

REGISTRO DE RECOMENDACIONES PARA PLAGAS VECTORES							
Cultivo: _____		Plaga: _____			Fecha: _____		
Expertos: _____							
Nº de caso	Etapa fenológica	Virosis Interna	Virosis Externa	Presencia de plaga	Recomendación según estadio de la plaga		
					Plaga_Estadio <sub>1</sub>	...	Plaga_Estadio <sub>n</sub>
1	Etapa <sub>1</sub>	Si	No	Moderada	Rec <sub>1</sub>		
...							
N							

#### 4.5.6 Diseño del Control de Plagas Vectores

Con la información recopilada en la tabla 4.27 se elaboraron las reglas de control que empleará el SE para emitir recomendaciones, las cuales tienen la siguiente estructura:

**SI** Etapa<sub>1</sub> y HayVirosisInterna y NoHayVirosisExterna y PresenciaModerada de Plaga\_Estadio<sub>1</sub> **ENTONCES** Rec<sub>1</sub>

A continuación presentamos un ejemplo para ilustrar el proceso descrito. Para esto, en la tabla 4.28 se muestran recomendaciones para Trips adultos.

**Tabla 4.28** Recomendaciones para Trips adultos (plaga vector) en cultivos de jitomate

Número de caso	Etapa fenológica	Virosis Interna	Virosis Externa	Presencia de plaga	Recomendación (Ingrediente Activo, Producto, Dosis, Indicación)
					Adultos
Caso 1	Desarrollo	No	No	Moderada	Azadirachtin, AZATIN XL, 0.7-1 L/Ha. Hacer una aplicación y revisar en 8 días.
Caso 2	Desarrollo	No	No	Crítica	Aceite mineral, SUNSPRAY, 2 L/Ha Aplicar hoy y volver a revisar en 6 días
Caso 3	Desarrollo	Si	No	Moderada	Extracto de Ajo, GARLIC, 1.5 L/Ha Aplicar hoy y volver a revisar en 8 días
Caso 4	Desarrollo	Si	No	Crítica	Abamectina, BIOMEK, 250-300 ml/Ha. Aplicar hoy y volver a revisar en 6 días
Caso 5	Desarrollo	No	Si	Moderada	Aceite Mineral + Azadirachtin, TRILOGY, 2 L/Ha. Aplicar hoy y volver a revisar en 8 días
Caso 6	Desarrollo	No	Si	Crítica	Bifentrina + abamectina, ATHENA, 1.5 L/Ha Aplicar hoy y volver a revisar en 2 días
Caso 7	Desarrollo	Si	Si	Moderada/Crítica	Neem, Keel Neem, 1L/Ha. Hacer una aplicación y revisar en 4 días.

A partir de la tabla 4.28, para el caso 3, podemos construir la siguiente regla:

## SI

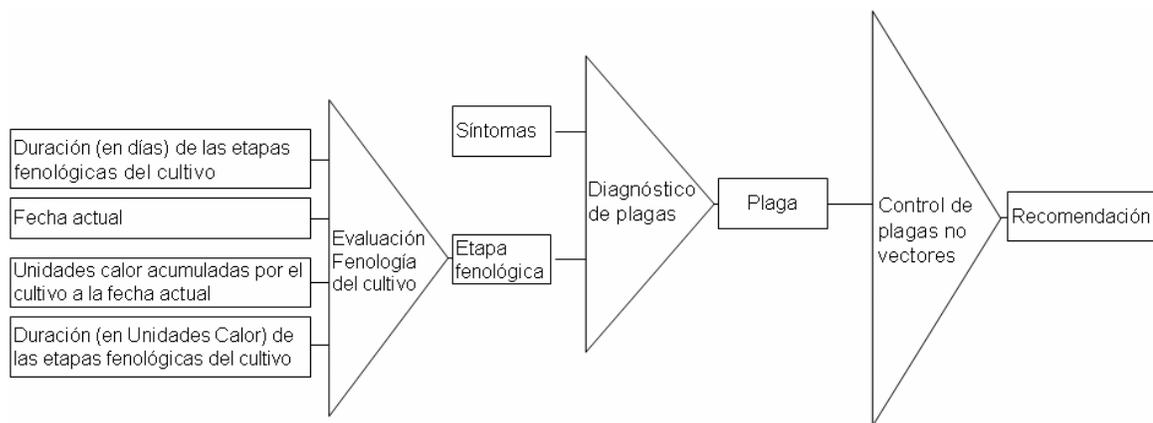
- La Etapa Fenológica del cultivo es Desarrollo **Y**
- Hay Virosis Interna de Trips **Y**
- No hay virosis externa **Y**
- Hay presencia moderada de Trips adultos

## ENTONCES

Se recomienda aplicar:

- Extracto de Ajo, GARLIC, 1.5 L/Ha, Aplicar hoy y volver a revisar en 8 días

Con esto concluimos la presentación del modelo de diagnóstico y control de plagas vectores. A continuación presentamos el modelo de diagnóstico y control de plagas que no son vectores. En la figura 4.5 se muestra todos los elementos (y sus relaciones de dependencia) que conforman dicho modelo.



**Figura 4.5** Mapa de dependencia para el Diagnóstico y Control de Plagas No Vectores.

Como podemos apreciar en la figura 4.5, el control de plagas no vectores, a diferencia de las que son vectores, se diferencia en que no evalúa el tamaño de las poblaciones de plagas, ni toma en cuenta la virosis, por cuanto ésta es sólo aplicable para el caso de los vectores, que son los que causan virosis en los cultivos. Por lo tanto, el control de plagas no vectores se hará considerando sólo la plaga que está causando el daño. La plaga será determinada a partir de los síntomas que presente el cultivo y de la etapa fenológica en que se encuentre éste. La etapa fenológica es estimada de igual manera que en los módulos vistos anteriormente.

#### 4.5.7 Adquisición de Conocimiento para el Diagnóstico de Plaga No Vector

Para determinar la plaga que está atacando al cultivo es necesario analizar los síntomas y la etapa fenológica del cultivo. Los formatos y la forma de trabajo en esta fase fueron similares a la desarrollada en la determinación de virosis interna, para el caso de plagas vectores. Es decir:

Primero: Se recolectaron los síntomas por cada plaga no vector, según la parte de la planta donde se manifestaba el daño, en el mismo formato presentado en la tabla 4.20.

Segundo: Se elaboró un registro único de síntomas (ver formato de la tabla 4.21), asignándole un identificador a cada síntoma.

Tercero: Se elaboró la matriz de correspondencia Síntoma/Plaga (ver tabla 4.22).

Cuarto: Se elaboró la matriz de correspondencia Síntoma/Etapa Fenológica/Plaga (ver tabla 4.23).

#### 4.5.8 Diseño del Diagnóstico de Plaga no Vector

La estructura de las reglas para diagnosticar una plaga no vector es:

**SI** (( S<sub>i</sub> o S<sub>j</sub> ) y Etapa<sub>n</sub>) **ENTONCES** Plaga<sub>m</sub>

Todo el proceso descrito, visto como esquema, es idéntico al proceso seguido para diagnosticar la virosis interna; sin embargo por cuestiones de orden y cuidando de emplear correctamente la terminología se optó por hacer la separación para un mejor entendimiento.

Dado que la estimación de la fenología del cultivo ya fue descrita en secciones previas, continuaremos con la adquisición de conocimiento y diseño del Control de Plagas No Vectores.

#### 4.5.9 Adquisición de Conocimiento para el Control de Plagas No Vectores

Para poder llevar a cabo este control se requiere determinar la recomendación apropiada, la cual está compuesta de los productos con las dosis apropiadas y sus respectivas indicaciones. Como vimos en la figura 4.5, la emisión de una recomendación es directa tras haber identificado a la plaga no vector. En la tabla 4.29 se muestra el formato elaborado para recolectar dicha información.

**Tabla 4.29** Formato para registrar recomendaciones para plagas no vectores de cultivos.

REGISTRO DE RECOMENDACIONES PARA PLAGAS NO VECTORES	
Cultivo: _____ Fecha: _____	
Expertos: _____	
Plaga	Recomendación
Plaga <sub>1</sub>	Rec <sub>1</sub>
...	
Plaga <sub>n</sub>	Rec <sub>n</sub>

#### 4.5.10 Diseño del Control de Plagas No Vectores

La estructura de las reglas de control para las plagas no vectores es como sigue:

**SI** Plaga<sub>n</sub>      **ENTONCES**      Rec<sub>1</sub>

En la tabla 4.30 presentamos la matriz de correspondencia Síntoma/Plaga para dos plagas no vectores del jitomate.

**Tabla 4.30** Matriz de correspondencia Síntoma/Plaga para Minador de la Hoja y Trozador.

Síntomas																				Plaga			
1	2	3	...	7	8	9	...	15	16	17	18	19	20	21	...	31	32	33	34	35	...	41	
					X			X	X	X	X												MDOR
																	X		X	X			TROZ

En la tabla 4.31 presentamos la matriz de correspondencia con los elementos necesarios, síntomas y etapa fenológica, para determinar la plaga que está atacando al cultivo.

**Tabla 4.31** Matriz de correspondencia Síntoma/Etapa Fenológica para diagnosticar Minador de la Hoja y Trozador.

Síntomas																				Etapa fenológica	Diagnóstico de Plaga			
1	2	3	...	7	8	9	...	15	16	17	18	19	...	31	32	33	34	35	...	41				
					X			X	X	X	X												Cualquiera	MDOR
															X		X	X					Desarrollo	TROZ

A partir de la tabla 4.31 podemos construir las siguientes reglas para diagnosticar la plaga presente en el cultivo.

**SI**

- Hojas con galerías
- Hojas con lesiones
- Hojas amarillentas
- Caída de hojas
- Hojas con tonalidades grisáceas

**ENTONCES**

La plaga presente en el cultivo es el Minador de Hoja

Dado que esta plaga puede atacar en cualquier etapa del cultivo no es necesario que la etapa fenológica forme parte de la regla. En la regla para Trozadores si es necesario considerar la etapa fenológica, como vemos a continuación:

**SI**

- ( - Hay plantas con falta de desarrollo
- Hay plantas marchitas
- Planta trozada en la corona
- )

**Y**

- La etapa fenológica del cultivo es Desarrollo

**ENTONCES**

La plaga presente en el cultivo es el Trozador

Después del diagnóstico, el SE procederá a emitir una recomendación. Para construir las reglas que le permitan hacer tal función, se empleó información como la mostrada en la tabla 4.32

**Tabla 4.32** Recomendaciones para Trozador y Gallina Ciega, plagas no vectores del jitomate.

Plaga	Recomendación
Trozador	Bifentrina, BRIGADIER 0,3 %, 20 kg/Ha, Aplicar hoy y revisar a los 2 días. Thiametoxam, ACTARA, 1-1.5 L/Ha, Aplicar hoy y revisar a los 2 días.
Gallina Ciega	Imidacloprid, PICADOR, 250 ml/Ha, Aplicar hoy y revisar a los 8 días. Thiodicarb, SEMEVIN 350 TS, 2L/Ha, Aplicar hoy y revisar a los 8 días.

La regla para controlar Trozador es:

**SI**

- La Plaga diagnosticada es Trozador

**ENTONCES**

Se recomienda aplicar alguno de los siguientes productos:

- Bifentrina, BRIGADIER 0,3 %, 20 kg/Ha, Aplicar hoy y revisar a los 2 días.
- Thiametoxam, ACTARA, 1-1.5 L/Ha, Aplicar hoy y revisar a los 2 días.

Con esta sección concluimos la explicación detallada acerca de la funcionalidad de cada módulo del SE, así como la explicación del proceso de desarrollo de cada uno.

#### **4.6 Representación y Técnica de Control del Conocimiento**

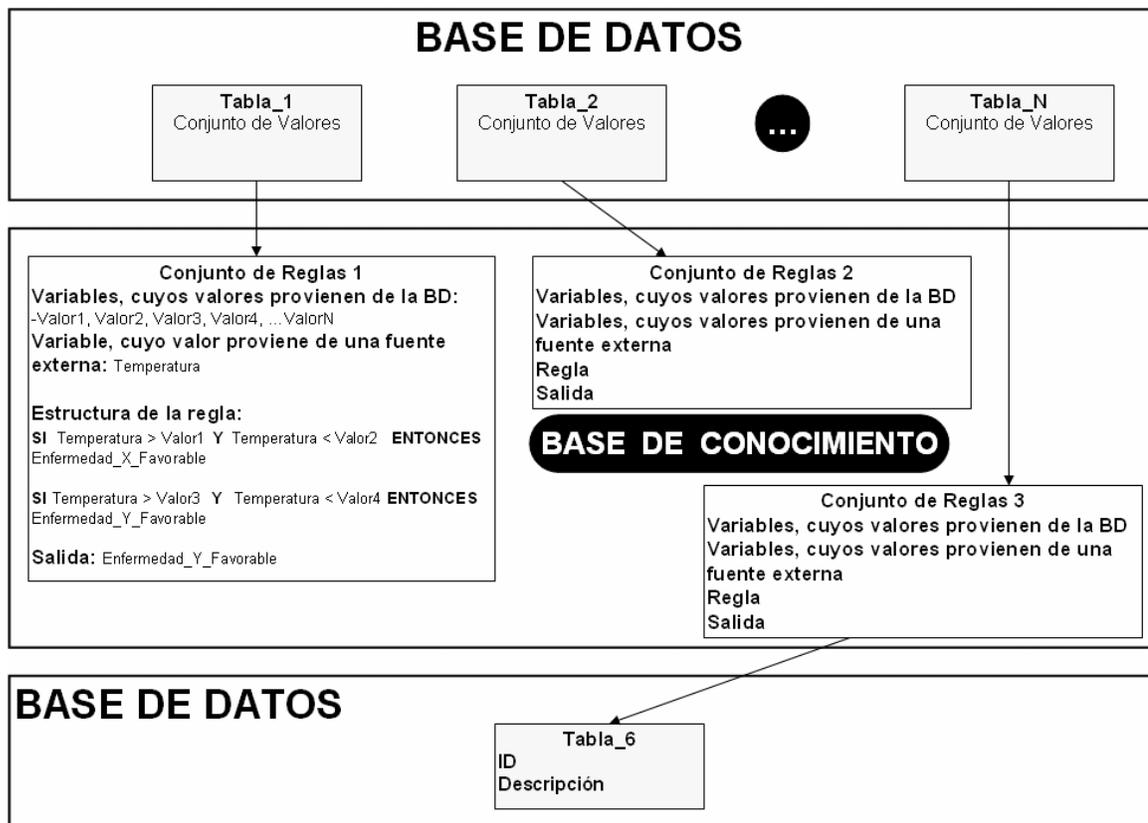
Como hemos visto en las secciones anteriores, se emplearon reglas para representar el conocimiento. Se eligió esta representación porque los enunciados del tipo SI...ENTONCES fueron la forma natural que los expertos emplearon durante las sesiones de trabajo. Por ejemplo:

**SI** Temperatura >  $X_1$  **Y** Temperatura <  $X_2$  **ENTONCES** Favorable\_Enf<sub>3</sub>

La estructura de la regla fue guardada en la base de conocimiento, mientras que los valores para las variables  $X_1$  y  $X_2$  son almacenados en la base de datos y Temperatura es un valor externo, proveniente de la estación agroclimática.

Como técnica de control del conocimiento se empleó el encadenamiento hacia adelante, es decir a partir de hechos buscamos alcanzar una meta. En este caso, una meta no es más que una recomendación, cuyo contenido está almacenado en la base de datos. Una vez encontrada la recomendación, el SE busca en la base de datos su contenido para proporcionársela al productor.

En la figura 4.6 se muestra el esquema general de la interacción entre Base de Conocimiento y Base de Datos.



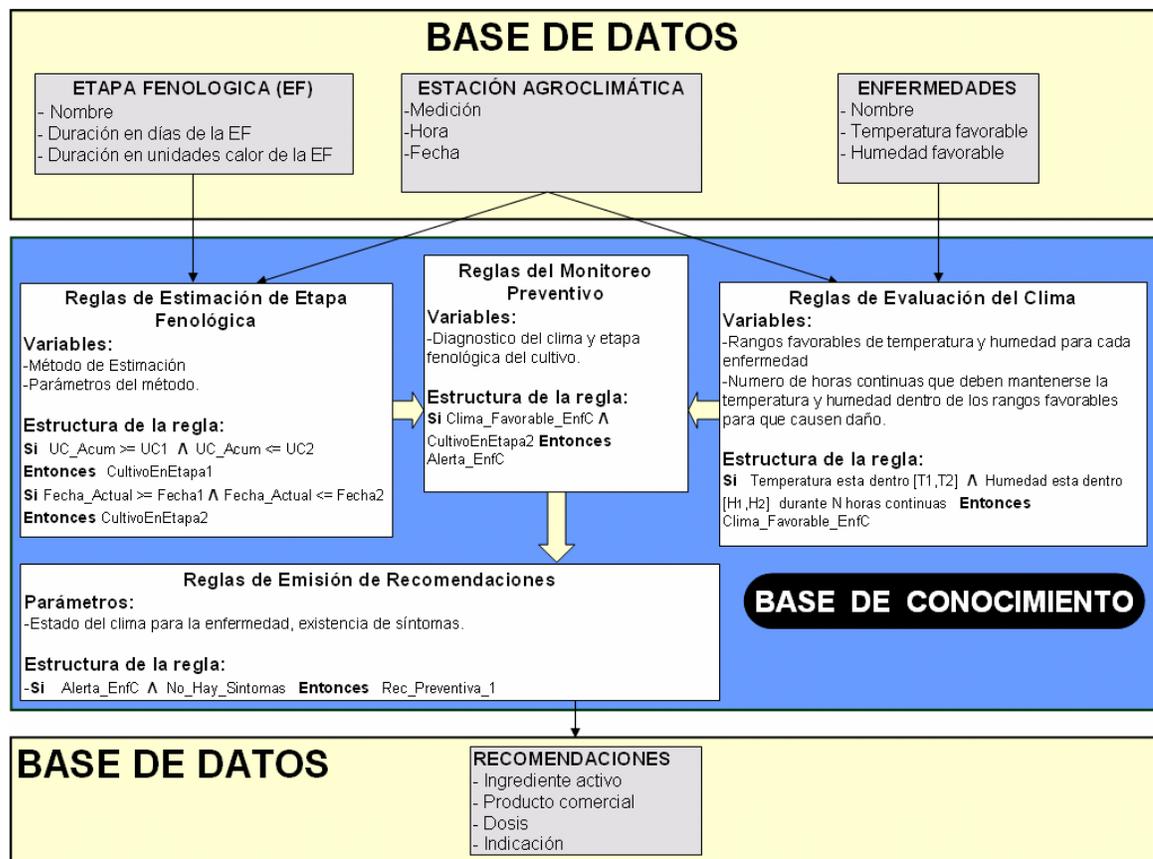
**Figura 4.6** Modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos.

En la figura 4.6, podemos apreciar que la Base de Datos contiene una serie de tablas que almacenan valores que servirán para alimentar a los diversos conjuntos de reglas, los cuales están almacenados en la Base de Conocimientos. Asimismo las conclusiones de las reglas de un conjunto de reglas, pueden servir de premisas para las reglas de otro conjunto. Esto ultimo podremos apreciarlo gráficamente en las siguientes secciones, donde se ilustrarán los modelos de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos especializados para cada módulo del SE.

## 4.7 Modelos de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos

### 4.7.1 Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades

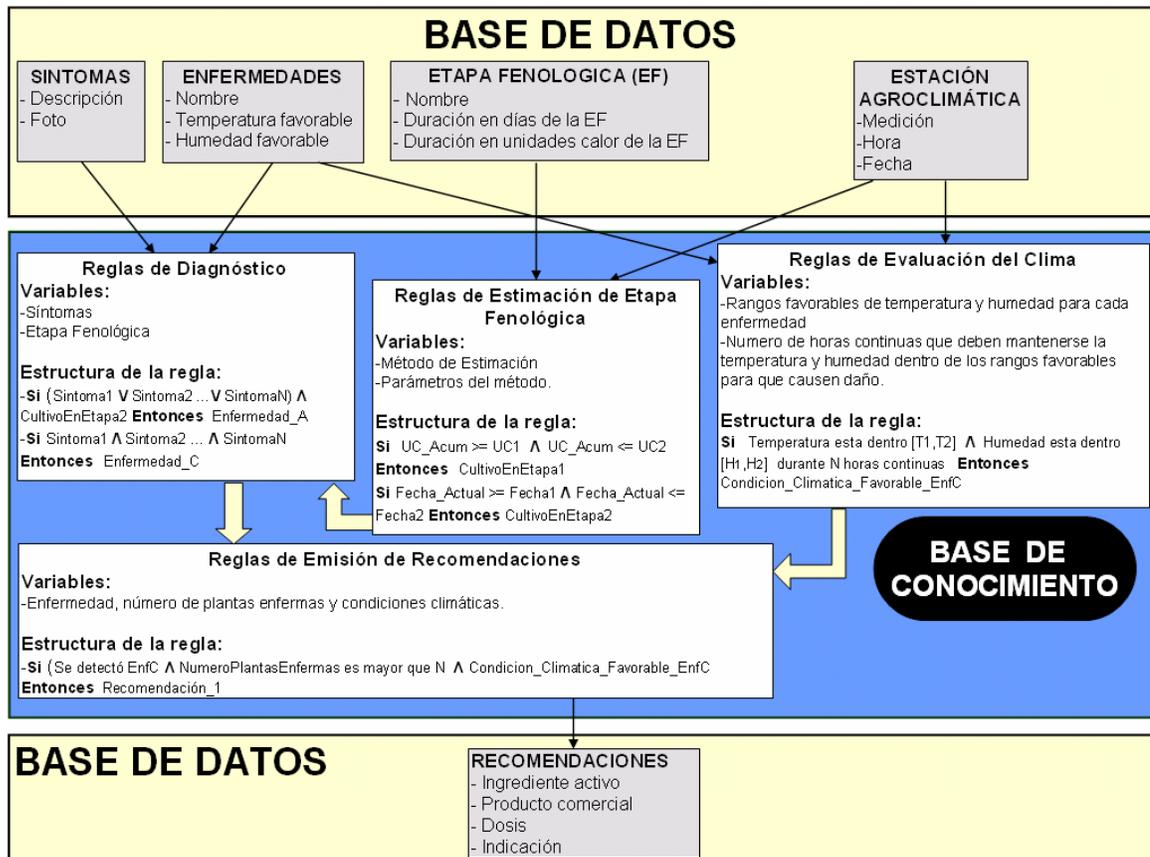
La primer tarea importante que cumple el SE es la de monitorear en forma continua el cultivo a fin de poder alertar sobre condiciones propicias para el desarrollo de enfermedades, así como ser una guía de que hacer en tales situaciones. Para alcanzar tal funcionalidad, se implementaron 4 conjuntos de reglas los cuales interactúan según el esquema presentado en la figura 4.7.



**Figura 4.7** Modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.

#### 4.7.2 Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades

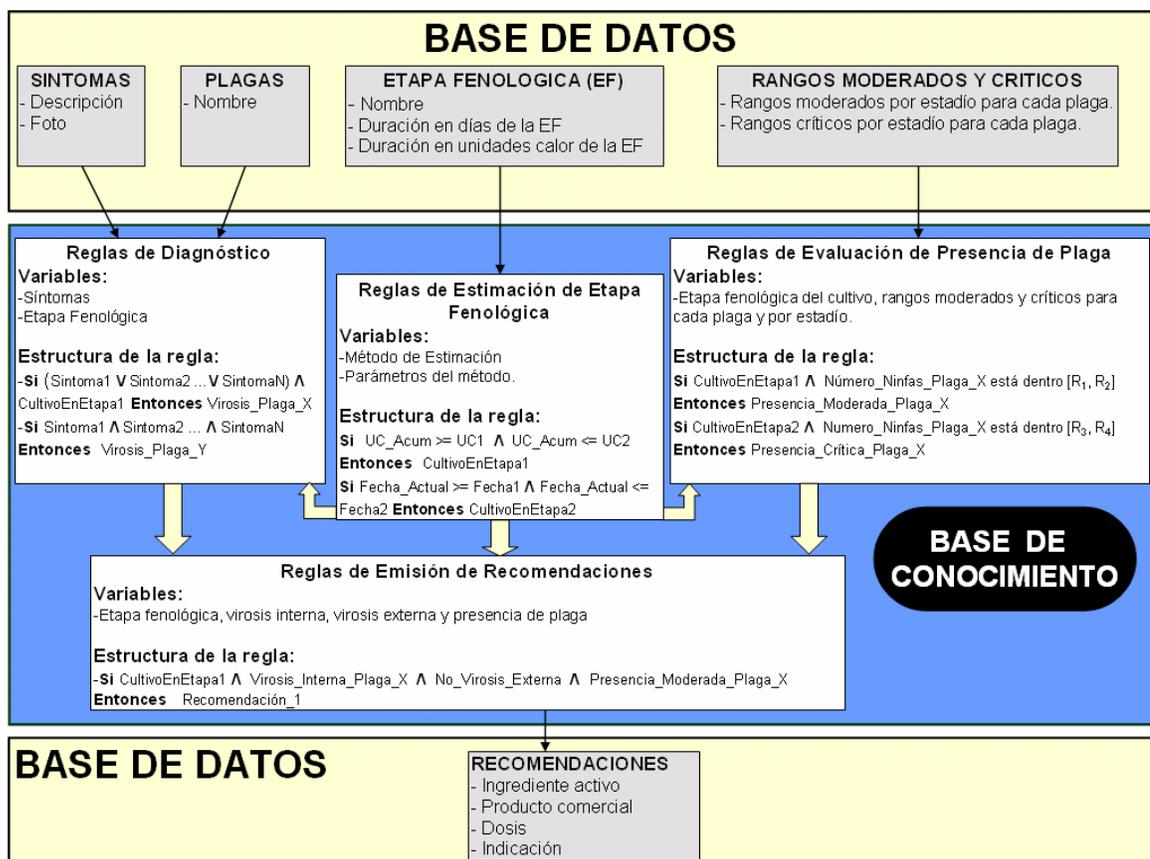
La segunda tarea que cumple el SE es la de servir de apoyo en el diagnóstico y control de enfermedades. Para esto, el SE tiene 4 conjuntos de reglas que le permiten diagnosticar la enfermedad, estimar la etapa fenológica del cultivo, evaluar las condiciones climáticas y emitir la recomendación pertinente para contrarrestar el problema que presenta el cultivo. Estos conjuntos de reglas interactúan entre si y con la base de datos según se aprecia en la figura 4.8.



**Figura 4.8** Modelo de interacción Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades.

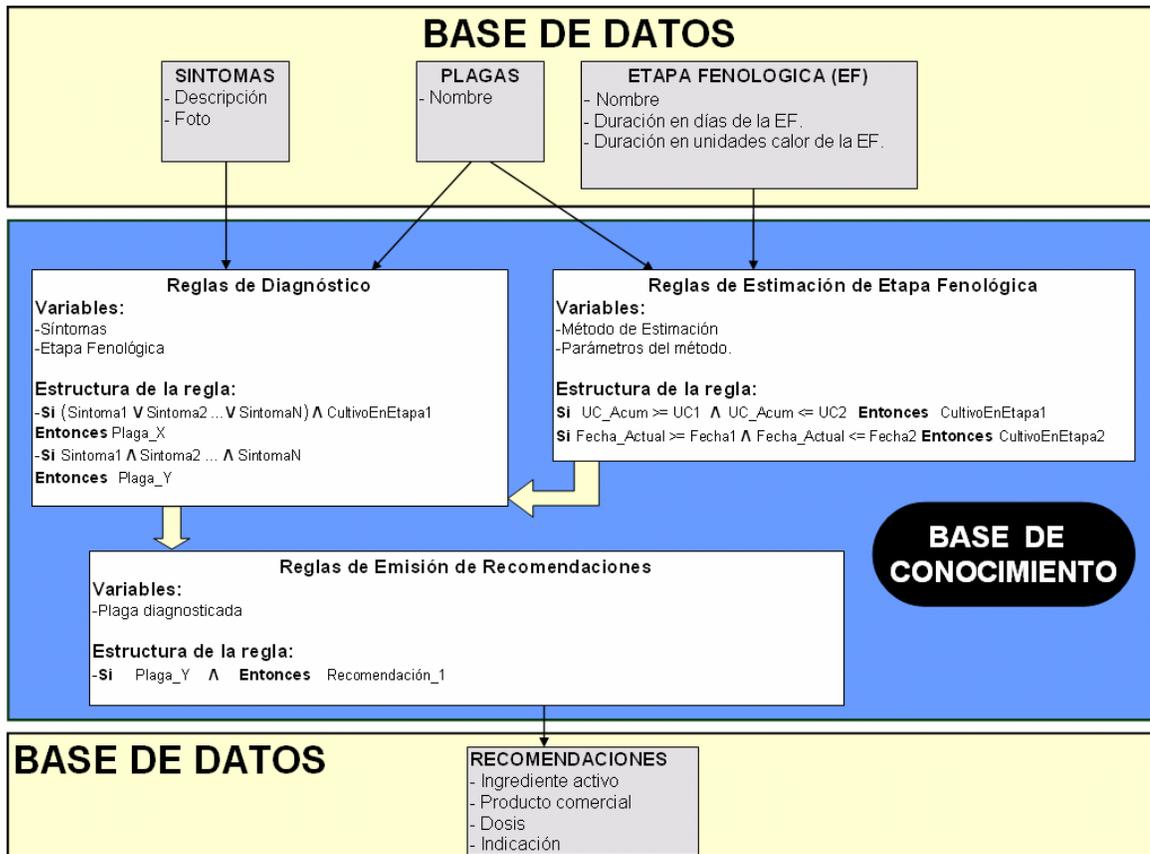
### 4.7.3 Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas

La tercer tarea que cumple el SE es la de servir de apoyo en el diagnóstico y control de plagas vectores y no vectores. Para el caso de las plagas vectores, el SE tiene 4 conjuntos de reglas que le permiten diagnosticar la virosis del cultivo, estimar la etapa fenológica del cultivo, evaluar la presencia de plaga y emitir la recomendación respectiva para combatir a la plaga se encuentra atacando al cultivo. Estos conjuntos de reglas interactúan entre si y con la base de datos según se aprecia en la figura 4.9.



**Figura 4.9** Modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (vectores).

En el caso de plagas no vectores, el SE emplea 3 conjuntos de reglas para diagnosticar y controlar el problema. En la figura 4.10 se muestra el modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos respectivo.



**Figura 4.10** Modelo de interacción de Base de Conocimiento - Base de Datos para el Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (no vectores).

#### 4.8 Validación de reglas

El SE fue validado por el equipo de expertos que participaron desde el inicio del proyecto. Esta validación comenzó desde los primeros prototipos del SE. Para validar cada conjunto de reglas se requirió escribir textualmente cada una de las reglas. Por ejemplo, la regla:

SI Temperatura  $\geq$  12°C y Temperatura  $\leq$  17°C y Humedad  $\geq$  70% y Humedad  $\leq$  90% y NroHorasPresentes = 5 ENTONCES ClimaFavorable\_TZTD.

Se traduce a:

**SI**

- La temperatura se encuentra entre los 12°C y 17°C      Y
- La humedad relativa, entre el 70% y 90%      Y
- Estas condiciones se han dado durante las últimas 5 horas

**ENTONCES**

Las condiciones climáticas son favorables para la presencia de Tizón Tardío.

**4.9 Validación de interfaz de usuario**

Se realizaron diversos prototipos para determinar la mejor forma de interacción Productor-Sistema Experto.

**4.9.1 Primer prototipo**

En el desarrollo de nuestro primer prototipo contemplamos la posibilidad de brindarle al usuario una interfaz donde el SE le vaya preguntando al usuario por síntomas y que describa cada uno de ellos a partir de un conjunto de posibles valores para cada síntoma. Por ejemplo:

- SE : ¿El cultivo presenta manchas en las hojas?
- Productor : Si
- SE : ¿De que tamaño son las manchas: pequeñas, medianas o grandes?
- Productor : Medianas.
- SE : ¿El color de las manchas es: negro, café oscuro, verde intenso?
- Productor : negro

Aunque a simple vista se asemeja a un dialogo humano, la principal desventaja fue lo prolongado del mismo. Asimismo nos preguntábamos: ¿El productor común y corriente del campo podrá describir adecuadamente los síntomas?. Había que considerar los diversos grados de capacitación que podían tener los productores y claro está, nuestra primera intención era la de desarrollar un sistema del que puedan sacar mayor provecho la enorme mayoría de productores. Tomando en cuenta todo esto, junto con el juicio de los expertos que conocen la realidad de los productores del

Estado de Michoacán, nos encaminamos en la tarea de diseñar un segundo prototipo que describimos a continuación.

#### **4.9.2 Segundo prototipo**

Para nuestro segundo prototipo pensamos en que la mejor forma sería presentarle los síntomas descritos tal cual en texto y luego de que el productor haya seleccionado todos los síntomas, proceda a ver una serie de imágenes, de las que debería seleccionar las imágenes que más se aproximaran a los síntomas observados en el cultivo. Este enfoque tuvo mayor aceptación entre los expertos, quienes consideraron que este diseño era mucho más amigable. Sin embargo surgieron algunas preguntas como: ¿Podrá el productor seleccionar adecuadamente las imágenes después de varias horas de haber revisado el cultivo, las recordará con exactitud? Entonces se pensó en rediseñar la interfaz, pero esta vez los cambios fueron ligeros, dando lugar al tercer prototipo que se convirtió en el sistema final.

#### **4.9.3 Tercer prototipo**

En este prototipo los síntomas fueron acompañados de sus fotos respectivas. Al momento de hacer las inspecciones al cultivo, los productores llevarán consigo un cuadernillo impreso con los síntomas y sus fotos, de esta forma, evitamos pérdida de datos por olvido.

En la validación de esta interfaz participó el equipo de expertos, así como 4 productores de distintos municipios de Michoacán. Tras la realización de pequeñas modificaciones de carácter secundario, quedó definida la versión final del SE.

En el siguiente capítulo presentamos los resultados obtenidos al término del trabajo descrito en este capítulo. Presentamos notas acerca de la implementación del SE, su interfaz gráfica de usuario y la interfaz gráfica de validación de reglas, la cual está orientada a darles una visión del funcionamiento interno del SE a los futuros desarrolladores que se encargarán de las tareas de mantenimiento del SE.

### Resultados

#### 5.1 Sobre la implementación del Sistema Experto

El modelo de SE propuesto fue implementado en Visual C#. Se optó por emplear este lenguaje debido a la flexibilidad del mismo y la disponibilidad de diversos componentes para el framework .Net, lo cual permitió diseñar e implementar una interfaz de usuario muy amigable, que fue un punto importante en la aceptación por parte de los expertos y de los futuros usuarios que fueron invitados en diversas reuniones realizadas durante el desarrollo del SE. Otros puntos a favor de la elección de este lenguaje fue el hecho de ya contar con las licencias respectivas.

Cabe mencionar que también se evaluó la posibilidad de emplear otras herramientas, tales como: Visual Prolog: Si bien es cierto, este lenguaje brinda la posibilidad de hacer interfaces gráficas, el inconveniente radicó en que toda el manejo de interfaces se hace también mediante programación lógica, lo cual difiere drásticamente del estilo de programación imperativo, esquema ampliamente utilizado en los lenguajes como java, c++, etc., con el cual el equipo de desarrollo estaba ampliamente familiarizado. No obstante, se hicieron algunos prototipos básicos con interfaces gráficas, pero dado que la herramienta no brinda la misma riqueza en interfaces graficas que un lenguaje como Visual Basic o Visual C#, se optó por descartar Visual Prolog.

Por otro lado, también se hicieron pruebas con Visual Rule Studio. La gran ventaja de esta herramienta es que se acoplaba al ambiente de desarrollo de Visual Basic 5.0 y 6.0 y una nueva versión para .Net estaba recientemente disponible. Se realizaron unos prototipos, tras los cuales se llegó a la conclusión que se podría emular las características de su diseño de programación de reglas y prescindir de esta herramienta. Tras lo cual, todo el desarrollo comenzó a hacerse en Visual C#.

Entre las características del SE podemos mencionar:

- Fue diseñado por completo, incluso la base de conocimiento, bajo la tecnología orientada a objetos.

- La base de conocimiento almacena las reglas que permiten al SE identificar la enfermedad o plaga que está atacando al cultivo, así como lanzar alarmas preventivas contra enfermedades. Asimismo, guarda las reglas que permiten al SE analizar la situación del cultivo y emitir la recomendación respectiva.
- La base de datos almacena los valores de las variables que forman parte de las reglas, así como todos los síntomas y fotografías de síntomas de plagas y enfermedades que son cargados en tiempo de ejecución. Asimismo, el SE registra en la base de datos todo lo que va ocurriendo durante el ciclo del cultivo, esto es: los diagnósticos realizados, los síntomas presentados, los productos aplicados, las revisiones realizadas, comentarios del productor acerca de los productos que aplicó, etc. Asimismo, se implementó una aplicación externa para facilitar la actualización de imágenes contenidas en la base de datos.
- Cuenta con un módulo interno que le permite leer los datos provenientes de la estación agroclimática. Para esto, la estación agroclimática escribe periódicamente los datos que va midiendo en un archivo, el cual es leído por el SE para extraer la información que necesita.
- Cuenta con un diseño robusto a prueba de fallas frente a las diversas situaciones que pudieran presentarse en el campo real, por ejemplo: Si la estación agroclimática deja de funcionar adecuadamente y no envía los datos requeridos por el SE, éste le brinda al usuario la posibilidad de ingresar los datos manualmente en caso fuera necesario. El usuario puede optar por no ingresar los datos y esperar a que la estación agroclimática envíe los datos. El SE es capaz de recuperar todos los datos que necesita, siempre y cuando estén disponibles.

El modelo está constituido de 8 conjuntos de reglas. En la tabla 5.1 se muestra el número de reglas del SE construido para el jitomate.

**Tabla 5.1** Reglas del SE construido para el Jitomate.

Módulos	Sub-módulos	Número de reglas
Módulo Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades	1. Estimación de la fenología del cultivo*	6
	2. Evaluación del clima*	8
	3. Monitoreo preventivo	8
	3. Control preventivo (Emisión de recomendación)	8
Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades	1. Estimación de la fenología del cultivo*	6
	2. Evaluación del clima*	8
	3. Diagnóstico de enfermedades	8
	4. Control (Emisión de recomendación)	14
Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas	1. Estimación de la fenología del cultivo*	6
	2. Diagnóstico de plagas	21
	3. Evaluación de la presencia de plaga	50
	4. Control (Emisión de recomendación)	218

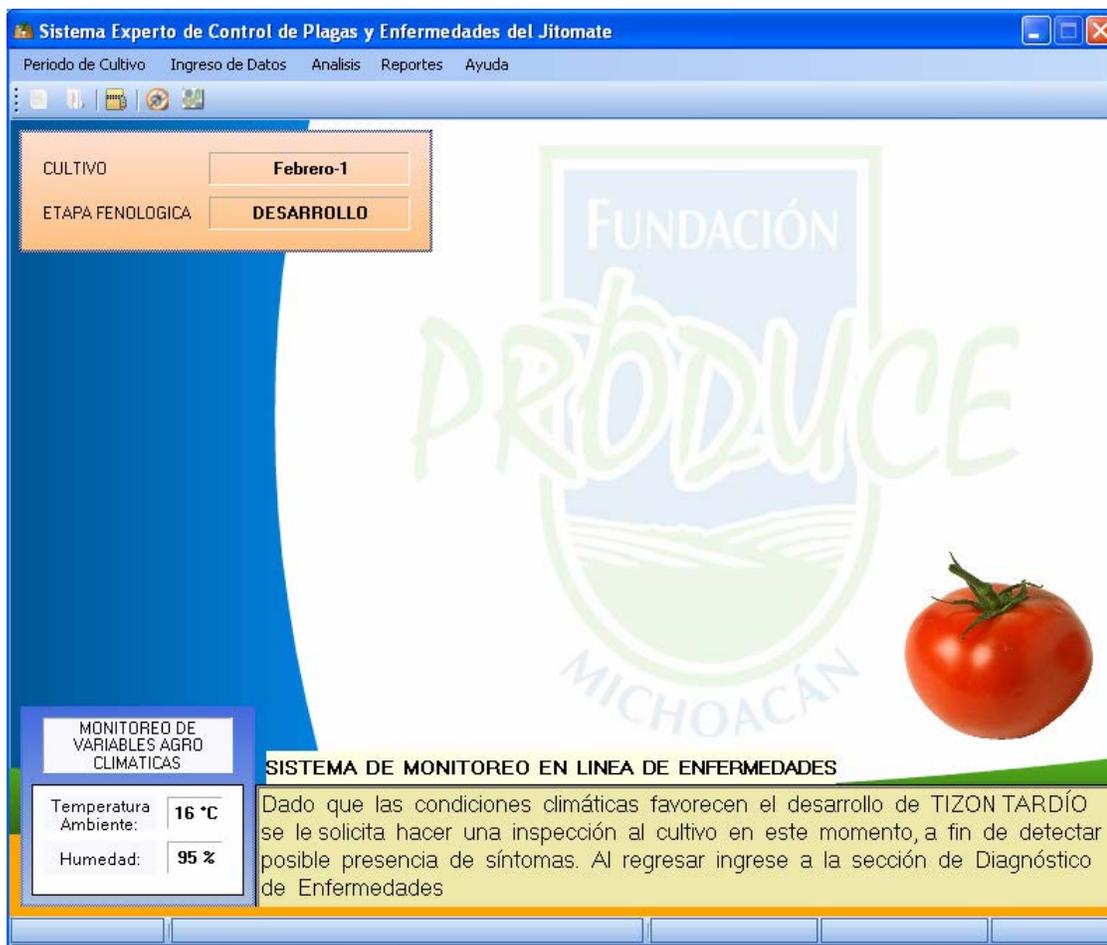
\* Los conjuntos de reglas para estimar la fenología y evaluar el clima son los mismos para todos los módulos, se muestran varias veces porque trabajan en varios módulos.

## 5.2 Descripción de la Interfaz de Usuario del Sistema Experto

En esta sección presentamos las principales interfaces a través de las cuales se alimentan a los módulos del SE, ya vistos en el capítulo anterior.

### 5.2.1 Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades

En la figura 5.1 tenemos la interfaz principal del SE. En la parte superior izquierda podemos apreciar el nombre del cultivo cargado y su etapa fenológica. En la parte inferior izquierda se muestra un recuadro con las variables climáticas cuyos valores son enviados desde la estación agroclimática. Al costado de dicho recuadro, se puede apreciar una alerta lanzada por el SE, indicando que se han dado las condiciones favorables para una enfermedad, en este caso Tizón Tardío, recomendando la inmediata inspección al cultivo.



**Figura 5.1** Emisión de una alerta.

### 5.2.2 Módulo Diagnóstico y Control de Enfermedades

A fin de iniciar un diagnóstico y recibir una recomendación, el productor debe ingresar los síntomas que presenta el cultivo, así como el número de plantas, según el esquema de muestreo, que presentan dichos síntomas. Asimismo, cada síntoma es ilustrado con una fotografía, la se muestra en grande cuando el síntoma es seleccionado. En las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 tenemos la interfaces para ingresar los síntomas que presentan los tallos, las hojas y los frutos de las plantas, respectivamente.

**Sintomas en el Tallo**

¿ Cuales de los siguientes sintomas presentan los tallos del cultivo ?

	Número de Plantas		Número de Plantas
 Lesiones grandes, irregulares y acuosas.	<input type="text" value="0"/>	 Lesiones necróticas e irregulares.	<input type="text" value="0"/>
 Manchas café oscuro a negro.	<input type="text" value="0"/>	 El tejido del tallo a nivel del suelo se vuelve blando y acuoso, con estrangulamiento.	<input type="text" value="0"/>
 Anillos concéntricos o manchas necroticas.	<input type="text" value="0"/>	 Pustulas negras o pardas abultadas.	<input type="text" value="0"/>
 Lesión hendida, elíptica, acuosa, de color gris.	<input type="text" value="0"/>	 Pequeñas manchas negras de 1 a 2 mm diámetro rodeadas de una aureola amarilla.	<input type="text" value="0"/>



**Siguiente** ➔

**Figura 5.2** Interfaz de captura de síntomas encontrados en tallos.

**Síntomas en las hojas**

¿ Cuáles de los siguientes síntomas presentan las hojas del cultivo ?

	Número de Plantas		Número de Plantas
 <input type="checkbox"/> Lesiones grandes, irregulares y acuosas.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Manchas verde-amarillentas.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Lesiones grandes de color castaño con la consistencia de papel.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Micelio fino y polvoriento en el envés, que le da a éstos un aspecto blanco o púrpura.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Lesiones en la cara inferior que pueden o no presentar un fino algodóncillo blanco-grisáceo.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Manchas pequeñas, oscuras, acuosas, rodeadas de un halo amarillento.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Tienen manchas en las hojas más viejas con áreas necróticas circulares o angulosas de color café oscuro, formando anillos concéntricos.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Pequeñas manchas negras de 1 a 2 mm diámetro rodeadas de una aureola amarilla.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Amarillamiento completo.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Destrucción de tejidos foliares.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Motas circulares de color café a negro de 1-2mm, en cuyo centro pueden presentar una mancha gris rodeada de una aureola amarilla.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Amarillamiento paulatino del racimo floral.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Agujeros en la hoja.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Necrosis de flor.	<input type="text" value="0"/>

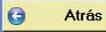
 



Figura 5.3 Interfaz de captura de síntomas encontrados en hojas.

**Síntomas en el Fruto**

¿ Cuales de los siguientes síntomas presentan los frutos del cultivo ?

	Número de Plantas		Número de Plantas
 <input type="checkbox"/> Lesiones firmes de color pardo-verdoso y de bordes irregulares, cuya superficie tiene una apariencia grasosa y áspera.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Crecimiento de micelio en el interior de los frutos.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Lesiones oscuras hundidas en la zona donde se inserta el pedúnculo.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Manchas pequeñas, acuosas, rodeadas de un halo blanquecino q da una apariencia grasosa. El centro es irregular, de color café y hundido.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Manchas ligeramente cafés a negras e irregulares.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Pequeñas manchas necróticas en el pedúnculo.	<input type="text" value="0"/>
 <input type="checkbox"/> Ataque al raquis de los frutos y contaminación de los mismos.	<input type="text" value="0"/>	 <input type="checkbox"/> Pequeñas marcas negras abultadas no mayor de 3 mm de diámetro.	<input type="text" value="0"/>

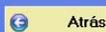
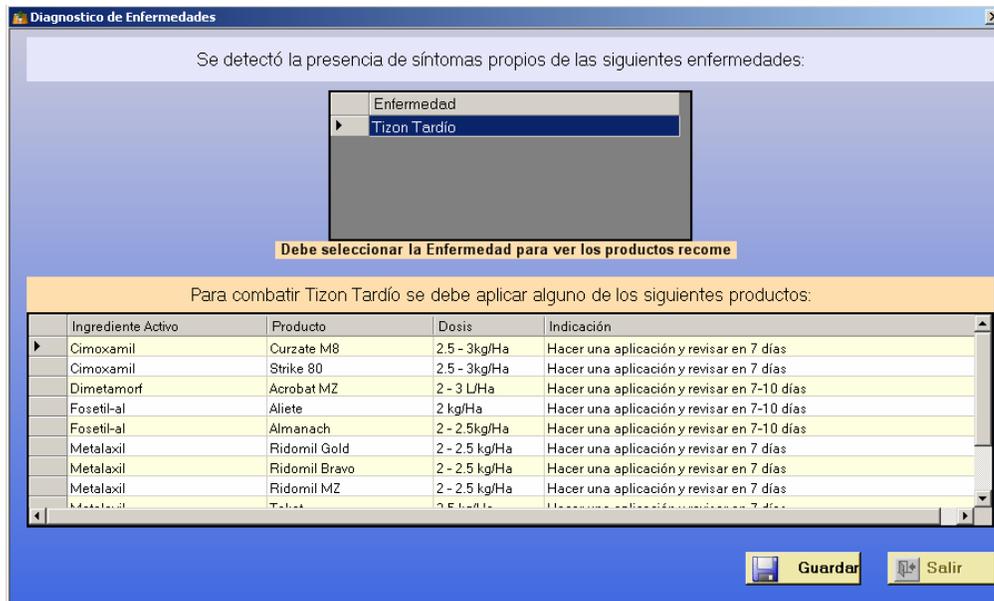
 



Figura 5.4 Interfaz de captura de síntomas encontrados en frutos.

En la figura 5.5 tenemos la interfaz donde el SE muestra la enfermedad que diagnóstico, así como su respectiva recomendación.

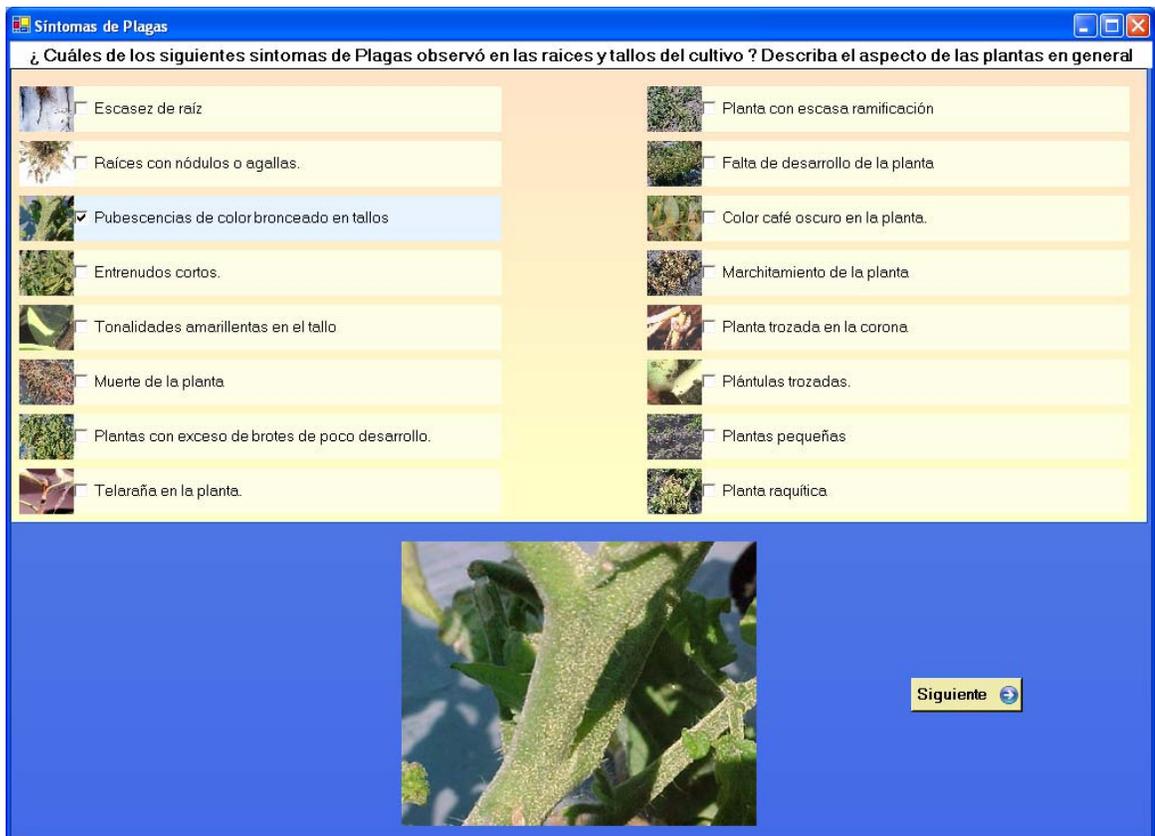


**Figura 5.5** Interfaz para mostrar resultados del diagnóstico y su respectiva recomendación

El productor debe seleccionar el producto que va a aplicar y esto queda registrado en la base de datos del SE para darle seguimiento e ir guardando una bitácora del cultivo. Estas funcionalidades escapan al ámbito del SE propiamente dicho, así que no se entrará en más detalle.

### 5.2.3 Módulo Diagnóstico y Control de Plagas

Para iniciar una sesión de diagnóstico y recibir una recomendación, el productor debe ingresar los síntomas que presenta el cultivo, así como los resultados de su muestreo población de plagas, según el esquema de muestreo predeterminado. Cada síntoma es ilustrado con una fotografía, la se muestra en grande cuando el síntoma es seleccionado. En la figura 5.6 tenemos la interfaz para ingresar los síntomas que presentan las raíces y tallos de las plantas, así como el aspecto que pudieran tener la planta en su conjunto.



**Figura 5.6** Interfaz de captura de síntomas de plaga en raíces y tallos, así como para describir el aspecto de las plantas.

En la figura 5.7 presentamos la interfaz para ingresar los síntomas que presentan las hojas, flores y frutos. Mientras que la interfaz de la figura 5.8 le servirá al productor para ingresar los resultados de sus muestreos de plaga, lo cual será empleado por el SE para determinar la presencia moderada o crítica de plaga.

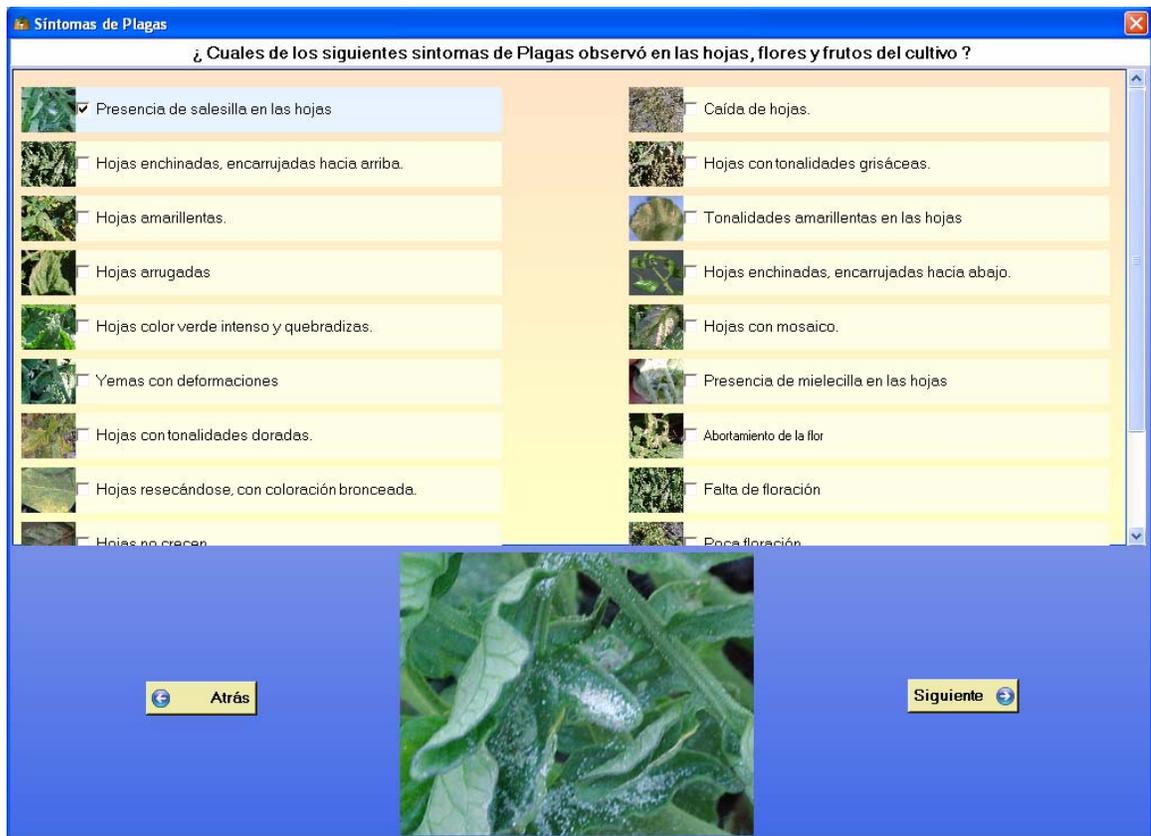
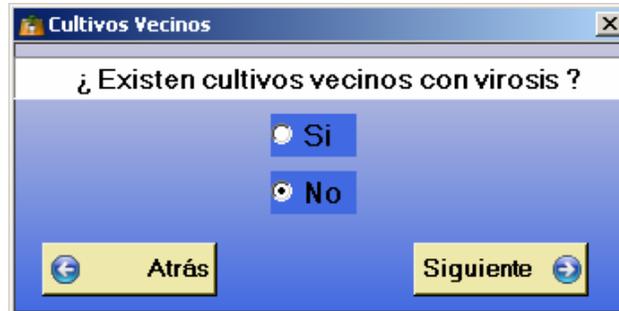


Figura 5.7 Interfaz de captura de síntomas de plaga en hojas, flores y frutos.

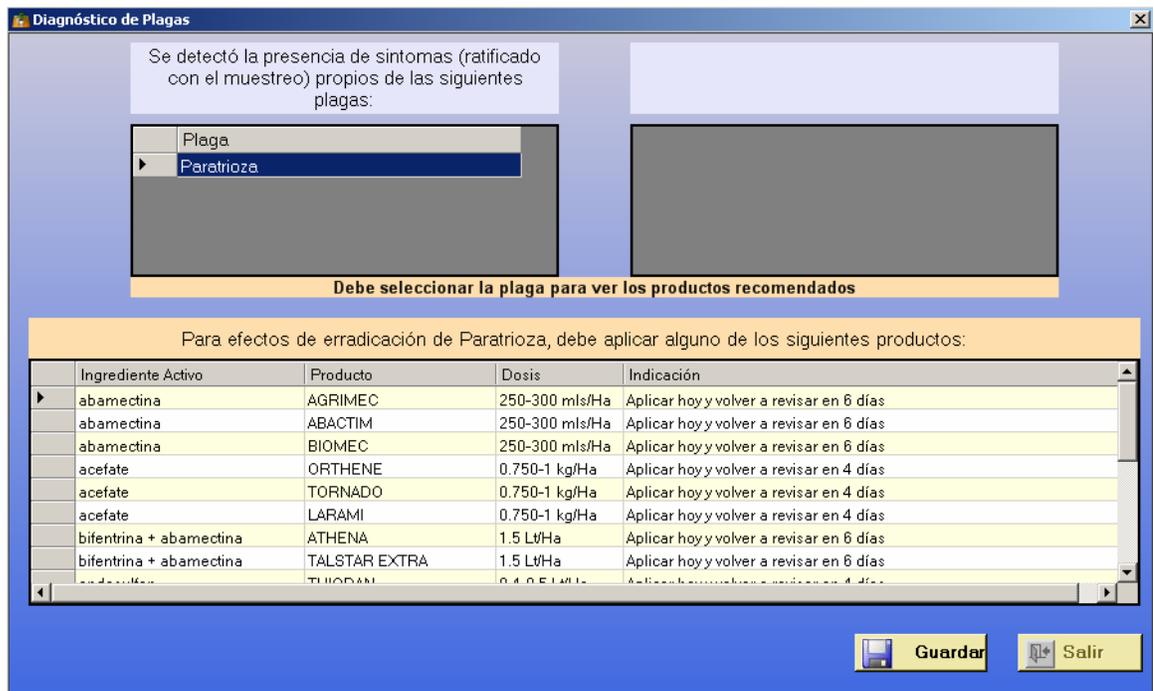


Figura 5.8 Interfaz de captura de resultados del muestreo poblacional de plagas.

En la interfaz de la figura 5.9, el productor puede indicar si algún cultivo vecino al suyo presenta virosis.



**Figura 5.9** Interfaz de captura de virosis externa.



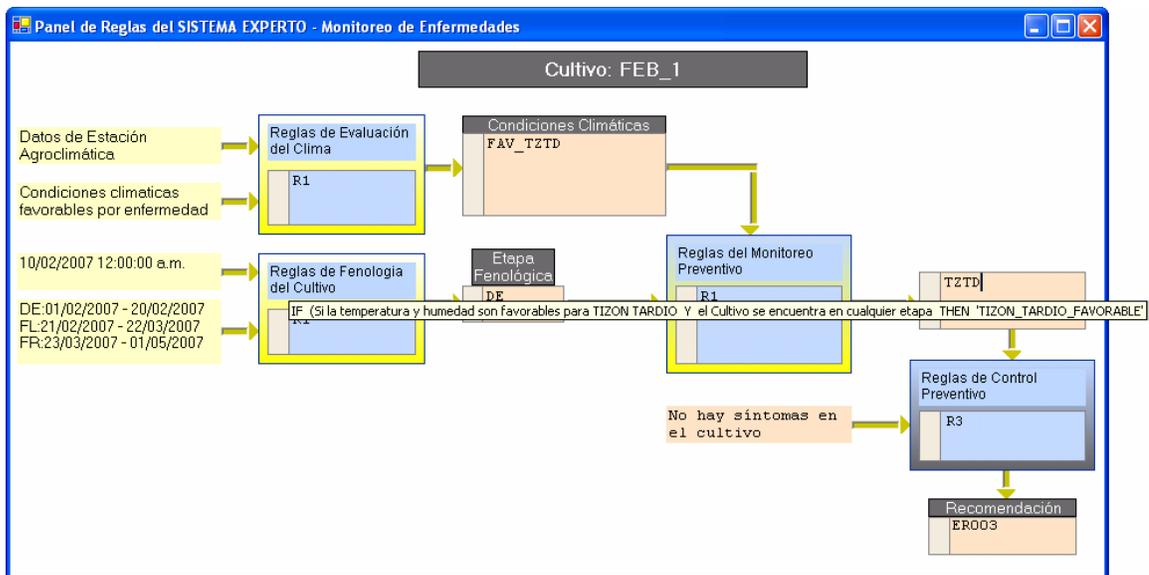
**Figura 5.10** Interfaz para mostrar resultados del diagnóstico de plagas (vectores y no vectores) y su respectiva recomendación.

## 5.2.4 Módulo de Explicación: Visualizador de Reglas

Con el fin de validar los resultados del SE, procedimos al desarrollo de una interfaz gráfica que muestra en tiempo de ejecución la activación de las reglas en cada módulo. Este módulo está orientado a los desarrolladores que eventualmente darán mantenimiento al SE en el futuro. Sin embargo, se puede emplear su diseño para desarrollar un módulo de explicación para los productores.

### 5.2.4.1 Visualizador de Reglas del Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades

La interfaz está diseñada de tal forma que se muestra por completo cada una de las reglas y los hechos ingresados y generados por la activación de reglas. En la figura 5.11 se muestra la regla 1 del conjunto de reglas llamado “Reglas de Monitoreo Preventivo”. También se aprecia que otras reglas se han activado en otros conjuntos de reglas. Al deslizar el mouse por encima de los identificadores de estas reglas, aparece el contenido de la regla.



**Figura 5.11** Visualizador de reglas del Módulo de Monitoreo y Control Preventivo de Enfermedades.

### 5.2.4.2 Visualizador de Reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades

En la figura 5.12 se muestra la regla 1 del conjunto de reglas llamado “Reglas de Evaluación del Clima”. De igual manera, aparecerá el contenido de la regla al posicionar el mouse en cada identificador de las otras reglas activadas.

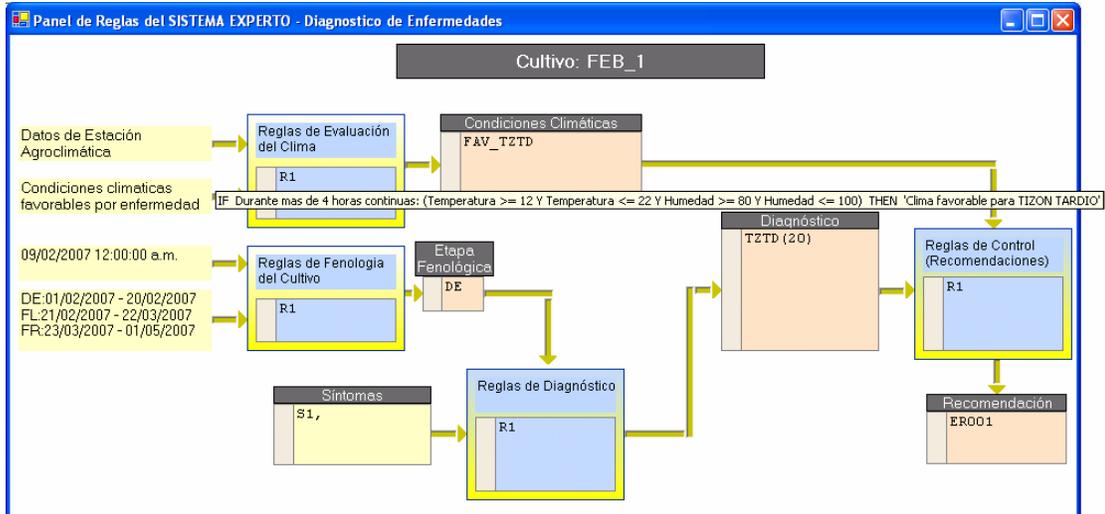
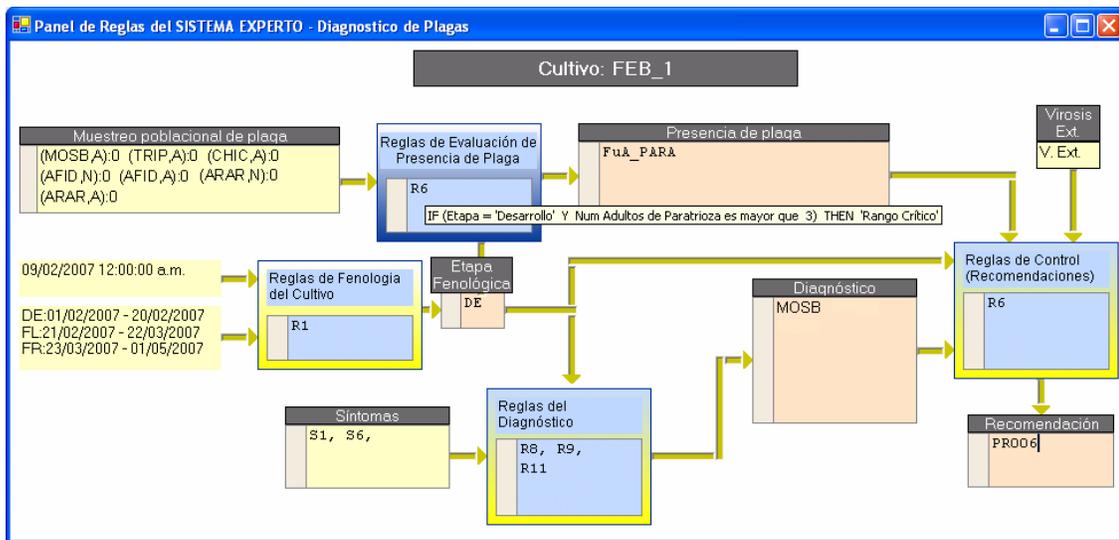


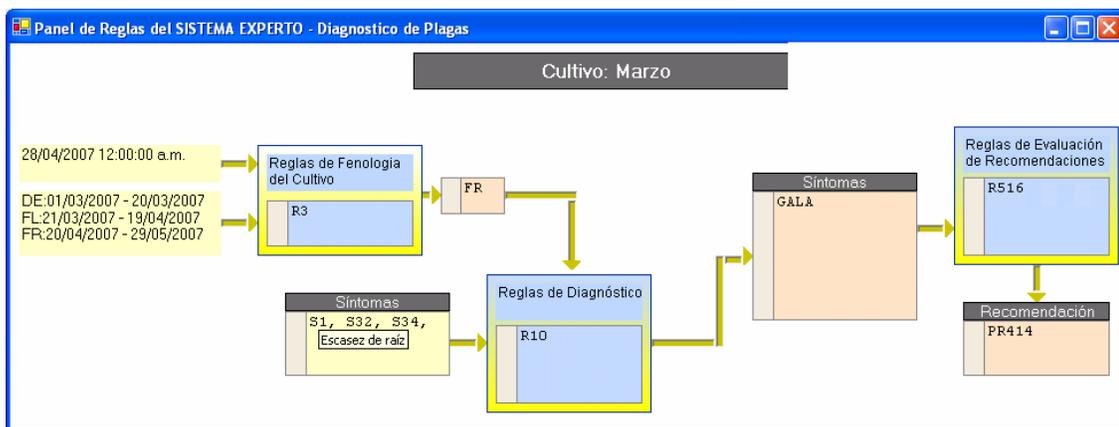
Figura 5.12 Visualizador de reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Enfermedades.

### 5.2.4.3 Visualizador de Reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas

Es el tercer y ultimo visualizador de reglas. En la figura 5.13 podemos apreciar su interfaz para el caso de las plagas vectores; mientras que en la figura 5.14, apreciamos un ejemplo de plagas no vectores. El funcionamiento es análogo al de los anteriores visualizadores.



**Figura 5.13** Visualizador de reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (Vectores)



**Figura 5.14** Visualizador de reglas del Módulo de Diagnóstico y Control de Plagas (No Vectores)

### 5.3 Validación del Sistema Experto basada en históricos

En la última validación realizada junto con los expertos, se procedió a simular situaciones, basándonos en registros históricos procedentes de cultivos de jitomate del 2006. Para ello, empleamos la siguiente información:

- Registros de condiciones climáticas.
- Bitácoras completas de 10 cultivos en diferentes municipios de Michoacán. Cada bitácora registra todos los incidentes ocurridos a lo largo del desarrollo del cultivo: Fechas de inicio,

aplicaciones de productos químicos y biológicos, síntomas presentados en el cultivo, resultados de muestreos, recomendaciones aplicadas dadas por técnicos y sus efectos posteriores en el cultivo, etc.

De las 10 bitácoras procedimos a seleccionar 30 situaciones diferentes. El equipo de expertos fue dividido en 2 grupos A y B. El Grupo A fue el encargado de analizar las situaciones seleccionadas y emitir sus distintos juicios sobre el problema. Los resultados fueron contrastados con los obtenidos por el Sistema Experto, tras lo cual se concluyó que en el 100% de los casos los resultados fueron idénticos.

El grupo B de expertos se dedicó a crear situaciones propias según su criterio y experiencia. Asimismo también se les solicitó que emitieran sus juicios. Todos los datos fueron ingresados al SE, en este caso logramos un 90% de resultados idénticos y un 10% de resultados similares.

Finalmente invitamos a un grupo de técnicos de nivel medio, a quienes se les planteo las 30 situaciones provenientes de las 10 bitácoras. Sus resultados los comparamos con los del SE. Apenas un 66% de los casos fue diagnosticado adecuadamente por los técnicos, frente al 100% de aciertos por parte del Sistema Experto. Tras estos buenos resultados procedimos a la identificación de determinados cultivos que servirán de prueba piloto y cuya implementación en campo, al momento de la redacción de la presente tesis, está muy próxima a realizarse.

Respeto al SE para aguacate, se han validado todos los conjuntos de reglas. Al momento de la redacción del presente trabajo, el equipo de expertos se encuentra recopilando los datos históricos necesarios para poder hacer simulaciones y posteriormente proceder a una prueba piloto, para lo cual ya se tienen seleccionados los productores que van a colaborar con dichas pruebas.

### Conclusiones, Principales Contribuciones y Trabajos Futuros

#### 6.1 Conclusiones

- La etapa de adquisición de conocimiento se constituye en la base fundamental del desarrollo de un SE y por ello es importante prever la mejor estrategia de abordar los inconvenientes que pudieran surgir. Entre ellos podemos mencionar:
  - Diversidad en los criterios de los expertos en la definición de los elementos necesarios para construir cada módulo del SE.
  - Diversidad de experiencias aun tratándose de expertos en el mismo dominio.
- El modelo de interacción base de datos-base de conocimiento facilitó el desarrollo del SE y su constante evolución, producto de la retroalimentación recibida por parte de los expertos. Asimismo será de mucha utilidad durante las tareas de mantenimiento de la base de conocimiento, dado que podemos actualizar directamente los valores en la base de datos sin tener que editar las reglas.
- Los visualizadores de reglas implementados permitieron validar las reglas y configurar de distintas maneras los valores de entrada del SE para ver como se comportaba el SE.
- Definir la mejor manera de interactuar con el usuario fue un elemento fundamental para la aceptación de los expertos y productores. Para lograr este propósito se implementó interfaces que describen textualmente el síntoma, brindando imágenes de los mismos. Con este tipo de interfaces buscamos que el productor aprenda a describir e identificar los síntomas con el uso continuo del SE. Esto es muy importante porque el nivel cultural de los productores, así como de los técnicos es muy diverso, encontrándose personas con un buen nivel de preparación así como personas cuyo nivel es muy pobre.
- Gracias a este SE, el productor estará en condiciones de mejorar la productividad de sus cultivos, sin la imperiosa necesidad de tener que depender de un técnico especialista, dado que el SE puede determinar la plaga o enfermedad que está atacando a su cultivo, así como la recomendación apropiada para contrarrestar el problema. De esta forma, permitirá la adecuada toma de decisiones, contribuyendo no sólo a la reducción de costos al fumigar cuando es necesario y en las cantidades necesarias; sino también, mejorando la calidad de los productos y promoviendo el cuidado del medio ambiente.

## **6.2 Principales Contribuciones**

- El SE desarrollado constituye el primer SE hecho en México, en este dominio, para contribuir con la mejora de la producción de frutos y hortalizas en Michoacán, lo cual constituye un paso importante dado que esto servirá de ejemplo para otros estados del país.
- La implementación de este SE permitió la transferencia de conocimiento producido por investigadores mexicanos de los campos experimentales de Michoacán, lo cual constituye un punto muy importante dado que cientos de productores tendrán acceso a este conocimiento gracias a esta importante herramienta.
- Este SE constituye un medio a través del cual se han uniformizado criterios de manejo integrado de cultivos, lo cual constituye un importante paso por cuanto las diversas Fundaciones Produce están avocadas al trabajo de promover y elaborar planes de manejo integrales de cultivos.

## **6.3 Trabajos Futuros**

- Es importante mencionar que este trabajo ha despertado el interés de otras Fundaciones Produce de otros estados del país. De esta forma queda abierta la posibilidad de que en poco tiempo se pueda estar desarrollando otras versiones del SE para dichas instituciones, lo cual haría que éste se consolide como la primera solución inteligente e integral producida en el país para el sector agrícola.
- El SE puede seguir evolucionando para abarcar otros aspectos del manejo de cultivos, que aun quedan pendientes, por ejemplo: manejo de riegos, manejo de nutrición de cultivos, de suelo, etc.
- Tomando como base el modelo desarrollado, se puede desarrollar nuevos modelos para invernaderos, donde los cultivos son manejados con mayor instrumentación, lo cual puede ser beneficioso, ya que serviría para enriquecer la base de conocimiento del SE.
- Otro punto importante es la predicción de variables climáticas. Con esto se podría hacer estimaciones más precisas del desarrollo del cultivo, así como del desarrollo de plagas, permitiendo con esto mejorar la eficacia del SE.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Prasad R. and Vinaya Babu A., “A Study on Various Expert Systems in Agriculture”, Georgian Electronic Scientific Journal: Computer Science and Telecommunications No. 4 (11), 2006.
- [2] Boyd D. W. and Sun M. K., “Prototyping an expert system for diagnosis of potato diseases”. Computers and Electronics in Agriculture, 10:259-267, 1994.
- [3] Prasad R., Rajeev Ranjan K., and Sinha A.K., “AMRAPALIKA: An expert system for the diagnosis of pests, diseases, and disorders in Indian mango”, Knowledge-Based Systems, Volume 19, Issue 1, pp 9-21, March 2006.
- [4] Mansingh G., Reichgelt H. and Bryson K., “CPEST: An expert system for the management of pests and diseases in the Jamaican coffee industry”, Expert Systems with Applications, Volume 32, Issue 1, pp. 184-192, January 2007.
- [5] Gerevini A., Perini A., Ricci F., Forti D., Ioratti C. and Mattedi L., “POMI: an expert system for integrated pest management of apple orchards”. AI Applications 6(3): 51-62, 1992.
- [6] Rafea A., El-Azhari S., Ibrahim I., Edrees S. and Mahmoud M., “Experience with the development and deployment of expert systems in agriculture”. Proceedings of IAAI, 1995.
- [7] Kamel A., Schroeder K., Sticklen J., Rafea A., Salah A., Schulthess U., Ward R. and Ritchie J., “An integrated wheat crop management system based on generic task knowledge based systems and CERES numerical simulation”. AI Applications 9(1), 1995.
- [8] Chadrasekaran, B., “Generic tasks as building blocks for knowledge-based systems: the diagnosis and routine design examples”. The Knowledge Engineering Review, 1988.
- [9] Yialouris C. P. and Sideridis A. B., “An expert system for tomato diseases”. Computers and Electronics in Agriculture 14: 61-76, 1996.
- [10] Sanchez Rodriguez G., “Sistema de Inteligencia de Mercados”. Fundación Produce Michoacán, 2007.
- [11] IPM-Online Statewide Integrated Pest Management Program –University of California  
Página web: <http://www.ipm.ucdavis.edu/>  
Última visita: Abril, 2007.

- [12] Pérez Domínguez F., Cervantes Ríos J., Guía para cultivar Jitomate en La Ciénega de Chapala y Bajío Michoacano, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2007.
- [13] Pérez Domínguez F., “Agenda Técnica para Asesores y Agentes de Cambio del Estado de Michoacán”, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2005.
- [14] Morales García J, Ochoa Ascencio S., Morales Barajas G., Fitosanidad en Horalizas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2003.
- [15] Lehmann-Danzinger, H., Introduction to integrated pest management of plant diseases and pests in the tropics/subtropics. University of Göttingen, Germany, 2004.
- [16] Agrios, G., Plant Pathology. Academic Press. San Diego, USA, 1997.
- [17] Goto, M., Fundamentals of bacterial plant pathology. Academic Press, New York, USA, 1990.
- [18] Blancard, D., Enfermedades del tomate. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 1990.
- [19] Hull, R., Matthew’s Plant virology. Academic Press, San Diego, California, 2002.
- [20] Baulcombe, D., Mechanism of pathogen derived resistance to viruses in transgenic plants, 1996.
- [21] Metcalf, R. L., Insecticides in pest management, pp. 245-314. In: R. L. Metcalf and W. H. Luckmann (eds.), Introduction to insect pest management. Third edition. John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [22] Pacheco C., Estrategia de manejo regional de insecticidas para la mosquita blanca de la hoja plateada (*Bemisia argentifolii* Bellows & Perring), pp. 127-147. In: J. J. Pacheco C. y F. Pacheco M. (Comps.). Temas Selectos para el Manejo Integrado de la Mosquita Blanca. Memoria Científica Núm 6. CIRNO-INIFAP-SAGAR, 1998.
- [23] Pacheco C., Parasitismo de la mosquita blanca de la hoja plateada (*Bemisia argentifolii* Bellows & Perring), en maleza y otras hospedantes, en el Valle del Yaqui, Son., 1996, pp. 32-33. In: J. J. Pacheco y F. Pacheco M. (Comps.). Mosquita blanca en el Noroeste de México, 1996. Memoria Científica Núm. 4. CIRNO-INIFAP-SAGAR. Cd. Obregón, Sonora, México, 1997.
- [24] Quintero, S. R., Bárcenas, G. I. J. D., Prospectivas del control microbiológico de plagas agrícolas. Curso Internacional para Inspectores Orgánicos IFOAM/BIOAGRICOOP. ExHacienda Caracha, Uruapan, Michoacán, México. Abril del 2000. Instituto Politécnico Nacional, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Centro de

- Investigación y Desarrollo en Agricultura Orgánica de Michoacán, CIECAS, Fundación Produce Michoacán y SAGAR, 2000.
- [25] Ruiz, F. J. F., La agricultura orgánica como una biotecnología moderada y ética en la producción de alimentos. Memorias del IV Foro Nacional sobre Agricultura Orgánica. Colegio de Postgraduados, 8 al 10 de noviembre de 1999. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Consejo Nacional Regulador de Agricultura Orgánica, 1999.
- [26] Garza, G. E. 1996. Agentes de control biológico en el combate de plagas agrícolas. Memorias del Primer Foro Nacional sobre Agricultura Orgánica. Colima, Col. 7 y 8 de noviembre de 1996. Universidad Autónoma Metropolitana – Xochimilco, Consejo Nacional Regulador de Agricultura Orgánica, Gobierno del Estado de Colima y SAGAR-INIFAP, 1996.
- [27] Lagunes, T. A. y Rodríguez, L. D. A., Producción y uso de insecticidas vegetales. En: Agricultura orgánica: Una opción sustentable para el agro mexicano. Editor Ruiz, F. J. F. Universidad Autónoma Chapingo, 1996.
- [28] Durkin J., Expert Systems: Design and Development, Macmillan, New York, 1994.
- [29] Marcellin S., La Representación del Conocimiento en el Desarrollo de los Sistemas Expertos, Notas del Curso: "Sistemas Expertos", Posgrado en Computación, UNAM, 2006.
- [30] Scott AC, Clayton JE, Gibson EL, A Practical Guide to Knowledge Acquisition, Addison-Wesley, New York, 1991.
- [31] Giarratano J. C. and Riley G.D., Expert Systems: Principles and Programming, Fourth edition, Course Technology, 2004.
- [32] Lynch T., "Intelligent support systems in agriculture: A study of their adoption and use", PhD Thesis, Faculty of Informatics, Central Queensland University, 2002.
- [33] Kemper V. N., Lara R. F., Ochoa T. L., "Manual para el Desarrollo de Sistemas Expertos", En proceso de edición, 2007.
- [34] Kemper V. N., "Sistemas Expertos para Incrementar la Productividad en la Industria y Negocios", Asociación Experto S.A., Lima, Peru, 1997.
- [35] Preece, A., "Towards a methodology for evaluating expert systems". Expert Systems (UK). 7(4):215-223, 1990.

- [36] Lehner P.E., Toward an Empirical Approach to Evaluating the Knowledge Base of an Expert System, IEEE Transactions on Systems, man and Cybernetics, vol. 19 no. 3, pp 658-662, 1989.

## Glosario

**Alcalino** Hidróxido metálico muy soluble en el agua, que se comporta como una base fuerte.

**Bandeado de venas** Amarillamiento de las venas principales de hojas maduras.

**Clorosis** Amarillamiento de las partes verdes de una planta debido a la falta de actividad de sus cloroplastos.

**Crisantemo** Planta perenne con tallos anuales, casi leñosos, hojas alternas, aovadas, con senos y hendiduras muy profundas, verdes por encima y blanquecinas por el envés, y flores abundantes, de colores variados, pero frecuentemente moradas. Procede de China y se cultiva en los jardines, donde florece durante el otoño.

**Entomopatógeno** Todo aquel microorganismo (bacterias, hongos, nemátodos) y virus que es capaz de matar insectos.

**Epizootia** Enfermedad que acomete a una o varias especies de animales, por una causa general y transitoria. Es como la epidemia en el hombre.

**Fitopatógeno** Microorganismo que causa daño a los vegetales.

**Ingrediente activo** La parte biológicamente activa del plaguicida.

**Inóculo** Gérmenes de toda naturaleza disponibles para una contaminación.

**Lepidóptero** Se dice de los insectos que tienen boca chupadora constituida por una trompa que se arrolla en espiral, y cuatro alas cubiertas de escamitas imbricadas. Tienen metamorfosis completas, y en el estado de larva reciben el nombre de oruga, y son masticadores; sus ninfas son las crisálidas, muchas de las cuales pasan esta fase de su desarrollo dentro de un capullo, como el gusano de la seda.

**Necrosis** Degeneración de un tejido por muerte de sus células.

**Patogenicidad** Capacidad de un agente infeccioso de producir enfermedad en un huésped susceptible.

**Patógeno** Que origina y desarrolla una enfermedad.

**Patología** Conjunto de síntomas de una enfermedad.

**Patovar** Variedad o conjunto de variedades de una bacteria, que presentan las mismas o similares características, pero se diferencian entre si en cuanto a su patogenicidad respecto a una o más plantas huésped.

**Plaguicida** Cualquier sustancia o mezcla de sustancias destinadas a prevenir, destruir o controlar cualquier plaga, incluyendo los vectores de enfermedades humanas o de los animales, las especies de plantas o animales indeseables que causan perjuicio o que interfieren de cualquier otra forma

en la producción, elaboración, almacenamiento, transporte o comercialización de alimentos, productos agrícolas, madera y productos de madera o alimentos para animales, o que pueden administrarse a los animales para combatir insectos, arácnidos u otras plagas en o sobre sus cuerpos. El término incluye las sustancias destinadas a utilizarse como reguladoras del crecimiento de las plantas, defoliantes, desecantes, agentes para reducir la densidad de fruta o agentes para evitar la caída prematura de la fruta, y las sustancias aplicadas a los cultivos antes o después de la cosecha para proteger el producto contra la deterioración durante el almacenamiento y transporte.

**Vector** Ser vivo que puede transmitir o propagar una enfermedad.