

TESIS DEFENDIDA POR
María Guadalupe Lugo Ibarra
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. José Antonio García Macías
Director del Comité

Dra. Ana Isabel Martínez García
Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván
Miembro del Comité

M.C. Raúl Rivera Rodríguez
Miembro del Comité

Dra. Ana Isabel Martínez García
*Coordinador del programa de posgrado
en Ciencias de la Computación*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

09 de Diciembre del 2009

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION**

**APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PREDICCIÓN DE PLAGAS Y
ENFERMEDADES EN CULTIVOS USANDO REDES INALÁMBRICAS DE
SENSORES.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

MARIA GUADALUPE LUGO IBARRA

Ensenada, Baja California, México, Diciembre 2009.

RESUMEN de la tesis de María Guadalupe Lugo Ibarra, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO en CIENCIAS DE LA COMPUTACION. Ensenada, Baja California. 09 de Diciembre del 2009.

APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA PREDICCIÓN DE PLAGAS Y ENFERMEDADES EN CULTIVOS USANDO REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES.

Resumen aprobado por:

Nombre

Dr. José Antonio García Macías

El sector agrícola se caracteriza por establecerse bajo condiciones de riego y de temporal. Las condiciones climatológicas en los cultivos pueden crear ambientes propicios para el desarrollo de plagas y enfermedades. Sin embargo, resulta complejo el estudio de los factores causantes de las mismas, como lo son: climáticos, tecnológicos, fitopatológicos, y más aun si se toman en cuenta otras variables como lo son los recursos (agua y suelo). La ausencia de modelos predictivos basados en parámetros climatológicos y fenológicos dificulta la respuesta en la predicción de las herramientas de software que hasta el momento sólo están enfocadas a un cultivo o región en particular.

En las últimas décadas se han presentado diversos avances tecnológicos en la materia, aunque éstos no se están explotando apropiadamente, como puede observarse en el caso de las redes inalámbricas de sensores en las que su uso se encuentra limitado al monitoreo de los cultivos, cuando podrían utilizarse para generar más beneficios.

En el presente trabajo de investigación se muestra el estudio de las técnicas y métodos para el desarrollo de un modelo predictivo, así como el análisis de los parámetros de los cultivos para predecir las plagas y enfermedades tanto a campo abierto como en invernadero.

Palabras Clave: Condiciones climatológicas, WSN, predicción de plagas y enfermedades, modelo predictivo.

ABSTRACT of the thesis presented by Maria Guadalupe Lugo Ibarra as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Computer Science. Ensenada, Baja California, México. Decembrer 2009.

DECISION SUPPORT MAKING FOR THE PREDICTION OF CROP PEST AND DISEASES USING WIRELES SENSOR NETWORKS

The agricultural sector is characterized by establishing under conditions of irrigation and temporary (seasonal). The weather conditions on crops can create propitious environments for the development of plagues and diseases. However, it is complex to study the factors causing them, such as: climate, technology, phytopathology, and even more if one takes into account other variables such as resources (water and soil). The absence of predictive models based on climatic parameters and phenological prediction difficult to answer in the software tools that are so far only focused on one crop or region especially.

In the last decades there have been several technological advances in the matter, although they are not being exploited properly, as seen in the case of wireless sensor networks in which their use is limited to monitoring of the crops, when they could used to generate more benefits.

This research work shows the study of the techniques and methods to develop a predictive model and the analysis of parameters for predicting crop pest (plagues) and diseases, both open field and greenhouse.

Keywords: weather conditions, WSN, prediction of plagues and disease predictive model.

Dedicatorias

A mi Tía Rosa †,
Papa Foncho †,
María Antúnez †,
Nana Amparo †,
y a mi familia.

Agradecimientos

A Dios, por su guía.

A mis Padres, Hermanas y mis abuelos Ana Alicia y Antonio por el amor que me brindan.

A mi asesor, Dr. J. Antonio García Macías por arriesgarse con este proyecto.

Al Dr. Roberto Conte por abrirme las puertas de CICESE, Dra. Ana Isabel Martínez por aceptarme en el posgrado, y al M.C. Raúl Rivera, por sus consejos y su paciencia.

A Luis González Covarrubias, por ser mi compañero en este difícil camino.

A Ismael Villanueva, Angélica Lenin Ley, Juan José Dorantes Aranda, y Eduardo Morales por enseñarme el verdadero significado de la amistad.

A los Dres. Edgardo Avilés, Leonardo Galicia, Daniel Fajardo, Erika, Edgar Pavía, Federico Graef, M.C. Liz, Pedro Damián y al M.C. Rolando Cárdenas, por la confianza y sus valiosos consejos. Al Dr. Pavel Iván Chúa Quijada, por su ejemplo de fortaleza.

A los Oceanólogos Enrique Strassburger y Naielli Estavillo por su hospitalidad en Acuacultura del Desierto.

A mis Maestros, M.C. María Luisa Yeomans, M.C. Cristina, M.C. Humberto Cervantes, M.C. Fco, M.C. Elitania, M.I. Juan Pablo Torres, M.I. Odin Meling L., M.I. Luz Evelia López Chico, Ing. Octavio Parra, por saber ser Maestros, compañeros, y amigos.

A Dora Alicia, “Delia y Pancho”, mis “Ninos” Guadalupe y Jorge, Fam. Glz Covarrubias, por su amistad y su apoyo incondicional. A “Dña. Pachita”, Dña. “Lola”, “Dna. Chonita”, y María Antunez †, por ser mi defensa ante el juez de la vida.

A Carito, Lydia, Norma Fuentes, Ivonne Best, Dolores Sarracino, Citlali Romero, y Guadalupe Morales Carrillo, por el cariño y el apoyo que me brindaron.

A los jovencitos William Leonardo, Paulo Benito, y Valentina, por los momentos felices que compartimos.

A mis compañeros: Fernando, Ismael, Liz, Nancy, y a la generación 2007-2009, gracias.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, por la oportunidad que me brindó.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por su apoyo económico.

CONTENIDO

Resumen en español.....	I
Resumen en ingles.....	II
Dedicatorias.....	III
Agradecimientos.....	IV
Contenido.....	V
Lista de figuras.....	VII
Lista de tablas.....	VII
CAPÍTULO I.....	I
INTRODUCCIÓN	I
I.1 INTRODUCCIÓN	1
I.1.1 Planteamiento del problema	2
I.1.2. Objetivo	4
I.1.3. Objetivos específicos.....	4
I.1.4. Preguntas de investigación	4
I.1.5 Metodología.....	6
I.1.6. Contenido de la tesis.....	8
CAPÍTULO II.....	9
INTRODUCCIÓN	9
II.1 REDES INALAMBRICAS DE SENSORES (WSN)	9
II.2 TRABAJO PREVIO DE WSN EN SUS DIFERENTES ÁREAS DE APLICACIÓN.....	10
II.3.1 Aplicaciones tecnologicas en el sector agricola.....	132
II.3.2 Importancia del ingreso de tecnologicas en el sector agricola.....	12
II.3.3 Problemática actual en el campo agricola.....	153
II.3.4 Aplicaciones de modelos predictivos en el sector agricola.....	155
II.4 ANÁLISIS DE MÉTODOS PREDICTIVOS	18
II.4.1 Algoritmos predictivos.....	18
II.4.2 Funcionamiento de un algoritmo	20
II.4.3 Observaciones de algoritmos predictivos.....	21
II.4.4 Algoritmos predictivos con aplicaciones en el campo agrícola.....	22
II.5 REDES NEURONALES	24
II.5.1 Elementos de una red neuronal	24
II.5.2 Arquitectura de una red neuronal	27
II.5.3 Aprendizaje	28
II.5.4 Fase de operación	28
II.5.5 Entrenamiento de redes neuronales.....	29
II.5.6 Algoritmo Retropropagacion (Backpropagation)	29

II.5.7 Redes neuronales con aplicaciones en el sector agrícola	30
II.6 ACTIVIDADES EN EL SECTOR AGRÍCOLA	31
II.6.1 Monitoreo de cultivos	31
II.6.2 Equipos de monitoreo en el mercado	32
II.6.2.1 Eko Pro Series	32
II.6.2.2 Climatecontrol	34
II.6.2.3 Dexmatech (DexCell).....	35
II.7 CONCLUSIONES.....	37
CAPÍTULO III.....	38
DEFINICIÓN DEL MODELO PREDICTIVO PARA LA PREDICCIÓN DE PLAGAS Y ENFERMEDADES.....	38
III.1 PARÁMETROS PREDICTIVOS.....	38
III.2.1 Clasificación de los parámetros predictivos	39
III.2.2 Relacion entre temperatura y humedad	43
III.3 MODELO PREDICTIVO (BASE)	48
III.3.1 Patrones de entrenamiento	49
III.3.2 Caracterizacion del modelo predictivo	50
III.3.2.1 Descripción de los grupos.....	52
III.3.2.2 Estructura de la red neuronal para el modelo predictivo	54
III.3.2.3 Incidencias	56
III.4.- COMPORTAMIENTO DEL MODELO PREDICTIVO	57
III.5.- CONCLUSIÓN	58
CAPÍTULO IV	59
SISTEMA PARA LA PREDICCIÓN DE PLAGAS Y ENFERMEDADES.....	59
IV.1 ÁREA DE ESTUDIO	59
IV.2 RED INALÁMBRICA DE SENSORES EN EL INVERNADERO TIPO ÁMBAR 960.....	60
IV.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA PARA EL MODELO PREDICTIVO	61
IV.3.1.1 Componente control predictivo	62
IV.3.1.2 Componente Manejador DBMS PPE	62
IV.3.1.3 Componente Manejador DBMS Eko.....	63
IV.3.1.4 Componente WSN.....	63
IV.4 DISEÑO DEL SISTEMA PREDICTIVO	65
IV.5 DIAGRAMAS DE SECUENCIA	69
IV.6 DISEÑO DE LA APLICACION	74
IV.7 CONCLUSIÓN	78
CAPÍTULO V	79
EVALUACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO	79
V.1 EVALUACIÓN DEL MODELO PREDICTIVO PPE.....	79
V.1.2 Variables	90
V.1.3 Procedimiento	90
V.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	90

V.2.1 Análisis de la evaluación del modelo predictivo	90
V.3 CONCLUSIONES	91
CAPÍTULO VI.....	92
CONCLUSIONES	92
VI.1 APORTACIONES	93
VI.2 LIMITACIONES.....	93
VI.2.1 Limitaciones en el campo	93
VI.2.2 Limitaciones para el estudio de variables.....	94
VI.3 TRABAJO FUTURO	95
VI.3.1 Tecnológico	95
VI.3.2 Estudio de campo.....	95
VI.3.3 Analisis de cultivos.....	95
VI.3.4 Metricas	96
VI.4 CONCLUSIONES.....	96
VII. REFERENCIAS	97
APÉNDICE A.....	101
A.1 RECOLECCIÓN DE DATOS	101
A.1.1 Reconocimiento del área de estudio	101
A.1.2 Métodos de riego.....	102
A.1.3 Recopilación de los datos.....	103
A.1.4 Conexión ssh para la extracción de los parámetros del equipo Eko Pro Series	104
APÉNDICE B.....	109
B.1 EXPERIMENTOS	110
APÉNDICE C.....	112
C.1 DIAGRAMAS DE CLASES Y EMPLAZAMIENTO.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Metodología utilizada durante el proceso de la presente investigación.	7
Figura 2: Modelo de cálculo de los parámetros dependientes.	23
Figura 3: Modelo climático para invernadero.	23
Figura 4: Elementos de una neurona artificial.	25
Figura 5: Modelo híbrido-paralelo.	30
Figura 6: Red inalámbrica de sensores, Eko Pro Series de Crossbow.	34
Figura 7: A) Sistema para el control del clima en invernaderos. B) Sensor de humedad para hoja. C) y D) Sensores para medir el flujo del agua y el pH, respectivamente	35
Figura 8: Detalle de un nodo inalámbrico, desarrollado por Dexma.	36
Figura 9: Relación entre las etapas fenológicas y los parámetros climatológicos.	42
Figura 10: Proceso de evaporación de una planta.	43
Figura 11: A) Incidencias de alertas. B) Posibles daños en el equipo (sensores).	51
Figura 12: Estructura de la red neuronal.	55
Figura 13: Comportamiento del modelo predictivo. A) WSN. B) Nodo base C) DBMS Eko. D) Comparación entre umbrales del cultivo, plagas y enfermedades. E) Modelo de predicción.	57
Figura 14: Acuicultura del desierto. Ubicación del equipo Eko Pro Series.	60
Figura 15: Componentes de la arquitectura para el modelo predictivo.	61
Figura 16: Escenario de la arquitectura.	64
Figura 17: Diagrama de casos de uso de la arquitectura propuesta.	66
Figura 18: Diagrama de secuencia del caso de uso establecer conexión.	69
Figura 19: Diagrama de secuencia del caso de uso ingresar información.	70
Figura 20: Diagrama de secuencia del caso de uso solicitar lecturas.	71
Figura 21: Diagrama de secuencia del caso de uso consultar predicción.	71
Figura 22: Diagrama de secuencia del caso de uso eliminar registros.	72
Figura 23: Diagrama de secuencia del caso de uso realizar predicción.	73
Figura 24: Gráfica del comportamiento del modelo predictivo.	74
Figura 25: Captura de pantalla de cultivo.	75
Figura 26: Captura de pantalla de plagas.	76
Figura 27: Captura de pantalla de enfermedades.	77
Figura 28: Captura de pantalla de predicción.	77
Figura 29: Plagas de tomate en invernadero.	84
Figura 30: Enfermedades del tomate en invernadero.	85
Figura 31: Plagas de la calabaza en invernadero.	86
Figura 32: Enfermedades de la calabaza en invernadero.	87
Figura 33: Plagas de tomate a campo abierto.	88
Figura 34: Enfermedades de tomate a campo abierto.	89
Figura 35: Invernadero Ambar 960, limpieza de exterior.	102
Figura 36: Riego por goteo en el invernadero ambar 960.	103
Figura 37: Conexión SSH.	105
Figura 38: Archivo para la solicitud de datos.	107
Figura 39: Archivo de datos de sensores.	107

Figura 40: Documentos compartidos en la conexión DBMS Eko y DBMS PPE.....	108
Figura 41: Ruptura en invernadero.	110
Figura 42: Presencia de moho.....	110
Figura 43: Cambio de tecnica para riego de cultivo.	111
Figura 44: Diagrama de emplazamiento que representa el modelo predictivo prototipo...	112
Figura 45: Diagrama que representa la relacion entre clases.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Lista de industrias seleccionadas para los premios Agrow Awards, Londres Inglaterra 2009.....	15
Tabla II: Observaciones del comportamiento de algoritmos de predicción.	19
Tabla III Funciones de activación.....	27
Tabla IV: Parametros utilizados en modelos predictivos..	40
Tabla V: A) Parámetros de etapas fenológicas. B) Parámetros generales.....	45
Tabla VI: C) Caracterización de algunas enfermedades del cultivo tomate perita.....	46
Tabla VII: D) Familias que pertenecen a las plagas E) tipo de plagas.	47
Tabla VIII: A) patrón de plagas y enfermedades B) y C) etapas fenológicas.	49
Tabla IX: Reconocimiento de los valores en alteraciones y daños al equipo.....	52
Tabla X: Clasificación de grupos para entrenamiento de la red neuronal.	53
Tabla XI: Relación entre plagas y enfermedades por condiciones climatológicas.....	54
Tabla XII: Toma de muestras	80
Tabla XIII: Muestra de parámetros de enfermedades.....	81
Tabla XIV: Muestra de parámetros de plagas.	81
Tabla XV: Plagas en invernadero. Cultivo tomate perita.	84
Tabla XVI: Enfermedades en invernadero. Cultivo tomate perita.	85
Tabla XVII: Plagas en invernadero. Cultivo calabaza.....	86
Tabla XVIII: Enfermedades en invernadero. Cultivo calabaza.....	87
Tabla XIX: Plagas a campo abierto. Cultivo tomate perita	88
Tabla XX: Plagas a campo abierto. Cultivo tomate perita	89

Capítulo I

Introducción

I.1 Introducción

El sector agrícola representa uno de los nichos de oportunidad más importantes para el desarrollo de aplicaciones tecnológicas en las últimas décadas (FAO, 2003). Debido a las demandas de los productos que se generan en este sector, en la actualidad, existen diferentes tecnologías utilizadas para incrementar la eficiencia del uso de los recursos en la producción. Entre los objetivos principales de estas tecnologías se encuentra el incremento en la calidad (tanto en métodos de cultivo, como del producto), además de buscar un control de los recursos tales como: agua, suelo y condiciones climatológicas, principalmente. Lo anterior se debe a que estos parámetros provocan ambientes propicios para el desarrollo de plagas y enfermedades entre otros daños, derivados de éstas últimas.

Los desarrollos tecnológicos de investigaciones, se han especializado en los problemas de toma de decisiones en el sector agrícola¹. Entre las disciplinas que fungen como apoyo a éstas investigaciones, se encuentran; la agricultura de precisión, agronomía y agrometeorología, además de herramientas de monitoreo constante en los cultivos (disminuyendo el tiempo de supervisión)². Un ejemplo de este tipo de herramientas son las

¹ <http://www.cinstrum.unam.mx/secciones/depar/sub4/sinte/sint.html> Red de Inteligencia Artificial para la Predicción de Plagas y Enfermedades en Frutas y Hortalizas en Michoacán. Patrocinador: Fundación Produce de Michoacán S.A.

² Proyecto D2ARS apoyado por el CYTED. "Propuesta de aplicación de redes de sensores en el modelado de cultivos protegidos y en campo"

redes inalámbricas de sensores (WSN, Wireless Sensor Networks, por sus siglas en inglés) con las cuales es posible monitorear parámetros tales como: humedad y temperatura, tanto de suelo como de ambiente, entre otros.

En el presente trabajo de investigación se propone un modelo de predicción, como una alternativa para alertar de los riesgos en el desarrollo de plagas y enfermedades en cultivos, antes de que se presenten los factores que propician el proceso de desarrollo de estas últimas. Lo anterior utilizando; WSN, caracterización de plagas y enfermedades, y finalmente la técnica de retropropagación de redes neuronales.

I.1.1 Planteamiento del problema

En México, como en todo el mundo, la producción en el sector agrícola ha tenido grandes problemas entomológicos y fitopatológicos (presencia de insectos y enfermedades en los cultivos), los cuales se han controlado por medio de diferentes alternativas. Una de las más importantes es la agricultura de precisión, la cual surge para gestionar los cultivos y llevar a cabo un control adecuado del uso de los recursos del campo, tales como: plaguicidas, fertilizantes, herbicidas, semillas, entre otros (Blackmore y Griepentrog, 2002; Bongiovanni, 2003).

Estas alternativas representan una herramienta valiosa e indispensable, para reducir las pérdidas en el sector agrícola³. Sin embargo, el uso empírico de los diferentes productos que se ofrecen en el mercado, provoca pérdidas que se reflejan no sólo en el sector agrícola, sino también en la salud del ser humano y en el ambiente⁴. En un esfuerzo por mejorar esta situación, se han incrementado las investigaciones para el desarrollo de diferentes herramientas tecnológicas (ya sea de software o de hardware) en este sector. (FAO, 2008).

³ Inifap, 1998, <http://www.inifap.gob.mx>

⁴ www.fao.com

Hoy en día se cuenta con el apoyo de diferentes áreas de investigación en busca de soluciones a las diferentes situaciones que se presentan en el sector agrícola, entre las cuales se encuentran; biotecnología, química, agricultura de precisión, y fitopatología, por mencionar algunas de ellas. Sin embargo cada una delimita el problema y busca una solución, desde la perspectiva particular del área de investigación que se encuentra. Por ello para cada nicho de oportunidad que se genera en el sector agrícola, se desarrollan distintas alternativas; las cuales están cimentadas en parámetros relacionados con el crecimiento del cultivo, el tipo de campo (campo abierto o cultivos protegidos), suelo, agua, soluciones para mejorar el producto final, así como también alternativas para el control de plagas y enfermedades (Herrero et al, 2007).

Al analizar este comportamiento natural, en el desarrollo de las diferentes investigaciones, se observa que el resultado es semejante al desarrollo de "un software hecho a la medida". Esto es, para cierta región de un país en donde se presenten plagas y enfermedades en cultivos, es posible desarrollar una herramienta de software que realice la "predicción" de las mismas. De llevarse a cabo esta acción, se tendría una herramienta de software para cada tipo de cultivo, tipo de suelo, entre otros. Aunado a esto, resulta complejo caracterizar todos los parámetros que se ven involucrados.

Lo anterior surge una vez más, por la variabilidad de las necesidades que presenta cada nicho de oportunidad. Esta situación se observa en el sector agrícola y las investigaciones relacionadas a este, alrededor del mundo. (Herrero et. al, 2007; Pohlheim y Heißner, 1997; Linker y Seginer, 2003).

En base a las diversas problemáticas mencionadas anteriormente, la presente investigación aborda esta situación, proponiendo un modelo sencillo de predicción de plagas y enfermedades en cultivos. El cual puede ser adoptado para la predicción de diversos cultivos tanto por entornos de campo abierto como de cultivos protegidos (invernaderos).

I.1.2. Objetivo

Estudiar los factores que originan el desarrollo de las plagas y enfermedades que afectan a los cultivos, y explorar los métodos y técnicas que permitan una temprana detección a través del uso de WSN.

Con lo anterior se busca alertar de posibles plagas y enfermedades antes de que éstas inicien su desarrollo en los cultivos.

I.1.3. Objetivos específicos

- Estudiar los factores que originan el desarrollo de plagas y enfermedades en cultivos.
- Estudiar el uso de herramientas de software para predicción.
- Estudiar los métodos y técnicas para gestionar la información resultado de la investigación.
- Proponer un modelo de predicción basado en la caracterización de las plagas y enfermedades de los cultivos.
- Proponer una herramienta de software como respuesta al estudio.

I.1.4. Preguntas de investigación

La presente investigación responde a las siguientes preguntas:

- 1.- ¿Cuál es el grado de aceptación para la aplicación de las nuevas tecnologías en el campo?
- 2.- ¿Cuáles son los factores que favorecen el desarrollo de los cultivos en invernaderos?

- 3.- ¿Cuál es el impacto del uso de redes inalámbricas de sensores en el sector agrícola, tanto para campo abierto como para cultivos protegidos?
- 4.- ¿Cuáles son los métodos de control de plagas y enfermedades, utilizados en el campo agrícola?
- 5.- ¿Qué métodos y técnicas de predicción se utilizan para el desarrollo de herramientas de software?
- 6.- ¿Cuáles son los parámetros básicos utilizados para la predicción de plagas y enfermedades?
- 7.- ¿De qué forma un modelo predictivo puede evitar el desarrollo de plagas y enfermedades en un cultivo protegido?
- 8.- ¿Qué tipo de consideraciones se deben tomar en cuenta para realizar un modelo predictivo?

I.1.5 Metodología

El desarrollo de la presente investigación se llevó a cabo en diferentes etapas, las cuales representan las actividades realizadas tanto en laboratorio como en el campo experimental.

Se utilizó una metodología muy similar a la que se utiliza en el desarrollo de software, debido a que permite una retroalimentación al final de cada etapa. A continuación se detalla cada una de éstas. Al finalizar la descripción se muestra gráficamente el comportamiento de la metodología en la figura 1.

Etapa 1: Planeación: En esta etapa se realizó la revisión de la literatura existente, en relación a los diferentes temas que requería la presente investigación. En particular en esta etapa, se organizó la forma en que se estudiaría cada uno de los temas.

Etapa 2: Análisis. En esta segunda etapa se encuentran dos objetivos: realizar el diseño de la caracterización de las plagas y enfermedades, y elegir una técnica para desarrollar el modelo predictivo, ambos representan los controladores del modelo general de predicción.

Es importante mencionar que en la primera y segunda etapa, se llevó a cabo el trabajo de campo para la recolección de datos, con el cultivo tomate perita, sembrado en el invernadero de la empresa Acuacultura del Desierto.

Etapa 3: Diseño. En ésta etapa se realizó el diseño del modelo predictivo, clasificando los parámetros necesarios para formar el patrón de entrenamiento de la red neuronal. Así mismo se realizaron las primeras pruebas del funcionamiento del modelo predictivo.

Etapa 4: Implementación. En esta etapa se desarrollaron pruebas del modelo predictivo en base a los datos recolectados en dos de los cultivos en invernadero, de esta forma se comprobaría su funcionamiento.

Etapa 5: Evaluación. Se realizó la evaluación del modelo, alimentándolo con datos de tres cosechas diferentes. Así mismo se realizó la evaluación funcional del software tomado en cuenta: la aceptación y la usabilidad del sistema.

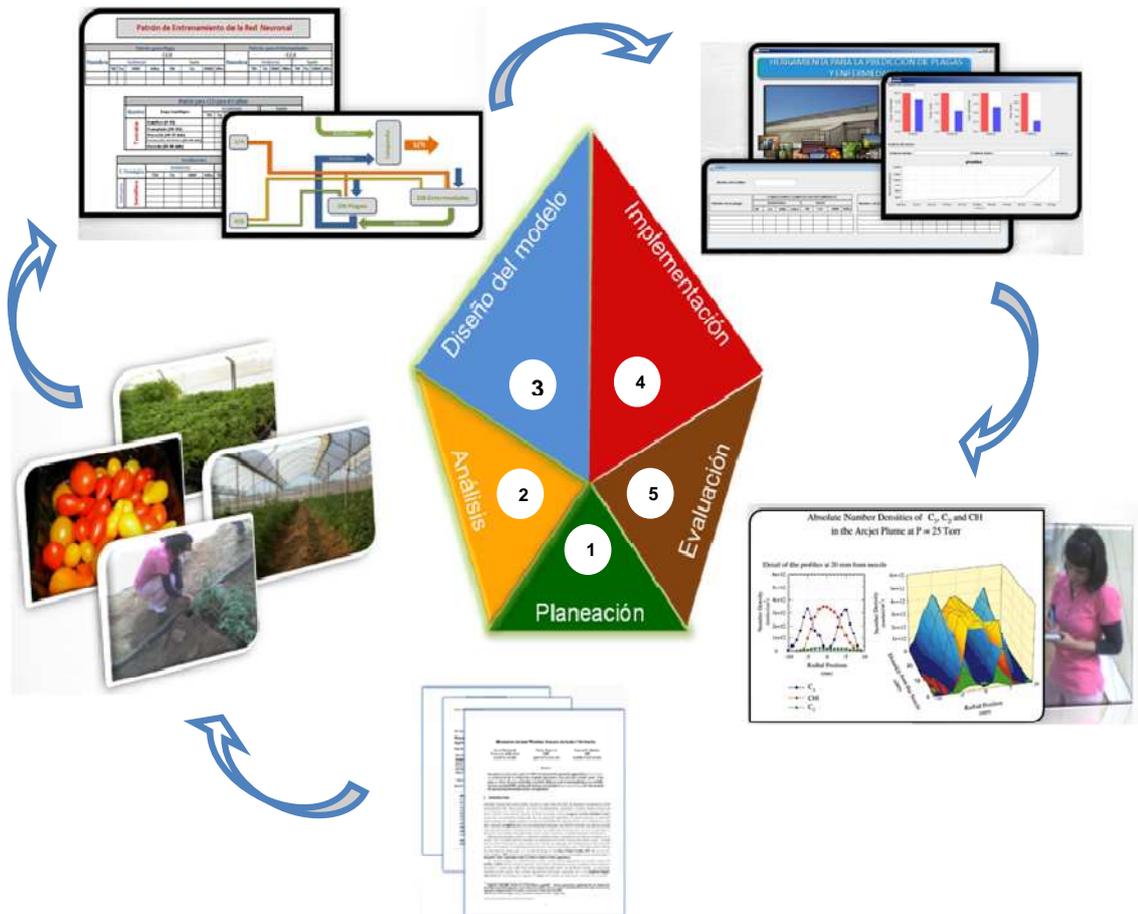


Figura 1: Metodología utilizada durante el proceso de la presente investigación.

I.1.6. Contenido de la tesis

La organización de éste documento es la siguiente: El segundo capítulo hace referencia a las aplicaciones y equipos tecnológicos desarrollados para el sector agrícola, la problemática actual, el trabajo previo y los métodos utilizados para resolver problemas en relación a este sector. En el tercer capítulo se analiza y justifica el método utilizado para el desarrollo del modelo predictivo, se describe el comportamiento del mismo y los parámetros que se utilizaron en base a las investigaciones anteriores. El cuarto capítulo describe el diseño de la arquitectura, la instalación del equipo Eko Pro Series (WSN)⁵, y los requerimientos de la arquitectura.

La evaluación tanto del sistema como del modelo predictivo, se presenta en el quinto capítulo, así como también los resultados de dichas evaluaciones. El sexto capítulo muestra el análisis de los resultados tanto del modelo como de la herramienta de software. Finalmente se presentan las conclusiones de la investigación, las limitaciones de la misma y el trabajo a futuro, así como algunas recomendaciones.

⁵ <http://www.xbow.com/eko>

Capítulo II

Introducción

II.1 Redes inalámbricas de sensores (WSN)

Una red inalámbrica de sensores se define como una gran cantidad de pequeños dispositivos, ad hoc, multipropósito, y red homogénea de nodos fijos que pueden desplegarse en un área determinada con cierto poder computacional, comunicación inalámbrica y capacidades de sensado (Römer et al., 2004). Estos pequeños dispositivos generalmente se diseminan sobre la región de estudio, donde cada nodo sensor es responsable de extraer datos del entorno tales como humedad, temperatura, presión, luminosidad, etc., procesando y enviando estos datos a través de uno o más nodos sumideros, los cuales se encargan de la transmisión de los datos al usuario final.

Actualmente los retos en el desarrollo de hardware y software en una red de este tipo se acentúan al considerarse el consumo energético, puesto que los nodos deben subsistir el mayor tiempo posible con baterías o con fuentes de energía de prestaciones ilimitadas, como las celdas solares. Las WSN emergieron como un nuevo elemento en el ecosistema de la tecnología de información y como un rico dominio de una activa investigación involucrando hardware y diseño de sistemas, redes, algoritmos distribuidos, modelos de programación, administración de datos, seguridad y factores sociales.(Avilés, 2007).

En este capítulo se hace referencia a las aplicaciones de las WSN y a los desarrollos en el sector agrícola, así como el impacto de estas tecnologías en los últimos años.

II.2 Trabajo Previo de WSN en sus diferentes áreas de aplicación

En la parte tecnológica podemos encontrar diferentes aplicaciones de las WSN tales como: (Römer et. al, 2004).

- **Monitoreo de glaciales:** los métodos que se utilizan pueden ser tanto redes de sensores como GPS. Sin embargo, el objetivo de ambas tecnologías es el mismo, monitorear el ambiente glaciar para obtener datos que apoyen el estudio de los cambios climáticos del planeta.
- **Monitoreo de aguas oceánicas:** éste estudio es considerado uno de los más ricos en cuanto a información se refiere, debido al tipo de los parámetros que se manejan tales como: temperatura, nivel de salinidad, localización de especies y perfil de la superficie oceánica. Gracias a la utilización de tecnologías como las WSN, se ha logrado predecir los cambios en esos ambientes.
- **Rescate de víctimas de avalanchas:** ésta es una de las aplicaciones críticas con respecto a la forma en que se rescata a las personas. Sin embargo es una de las mejores soluciones que existen gracias a la utilización de algoritmos que proveen información oportuna de las víctimas (respiración, pulso, etc.).
- **Localización de francotiradores:** en cuestiones de seguridad es necesario conocer la localización exacta de los individuos. Principalmente se utiliza para conocer la trayectoria de las balas.

- Observación de aves: se utiliza para estudiar el comportamiento de las aves y su interacción con el medio ambiente, así como las actividades que llevan a cabo para conocer su migración.
- Monitoreo de un hábitat: aquí se pretende recolectar información en relación a las condiciones de diversos organismos y con ello resolver los problemas que afectan a los animales, plantas y a los seres humanos.
- Sector agrícola: se realizan desarrollos para el monitoreo de cultivos, observando los principales factores que afectan este sector, como lo son: las plagas y enfermedades. Las cuales pueden ser detectadas por medio de la observación o bien utilizando redes inalámbricas de sensores, las cuales detectan: temperatura, humedad, luminosidad, entre otros parámetros, para así obtener una mayor precisión en la lectura de los datos.

Así mismo las líneas de investigación para las WSN, que actualmente se encuentran abiertas, son:

- El monitoreo de aplicaciones civiles.
- Salud
- Rastreo
- Supervisión del ambiente acuático
- Diseño de hardware más pequeño
- Modalidades de ahorro de energía de operación
- Protocolos de comunicación
- Estrategias de seguridad
- Mayor soporte para la calidad de servicio
- Proporcionar mayor heterogeneidades de los dispositivos.
- Soporte y coordinación de las aplicaciones concurrentes, entre otras.

En relación el sector Agrícola se tiene un interés especial en desarrollar aplicaciones y herramientas tecnológicas que apoyen lo siguiente:

- Incrementen los productos para obtener mayor calidad
- Controlen o erradiquen los principales factores que causan daños en los cultivos, como lo son las plagas y las enfermedades.
- Disminuyan los costos en el mantenimiento de los cultivos

Sin embargo, la tecnología presentada hasta el momento se enfoca en controlar los factores mencionados anteriormente. Por lo que es necesario concentrarse tanto en las investigaciones como en el desarrollo de los productos, para resolver los factores principales que aquejan el sector agrícola, entre ellos: la calidad y los altos costos en los cultivos.

II.3.1 Aplicaciones tecnológicas en el sector agrícola

Entre las principales áreas de aplicación de tecnologías para el cuidado de los cultivos, se encuentra: monitoreo, caracterización del suelo y agua, uso adecuado de los fertilizantes en la nutrición y la reducción del impacto ambiental (Cárdenas Tamayo, 2008). En la actualidad existen diferentes tecnologías utilizadas para incrementar la eficiencia del uso de éstos recursos durante la producción en los cultivos, principalmente para apoyar la toma de decisiones, como lo es la agricultura de precisión.

Las WSN se han destacado en el sector agrícola, debido a las importantes aportaciones que se desprenden de las diferentes investigaciones.

II.3.1 Importancia del ingreso de tecnologías en el sector agrícola

En México, se han originado avances tecnológicos importantes en materia agroindustrial. El sector agrícola se considera una de las áreas que ha tenido apoyo tecnológico en los últimos años (FAO, 2003), debido a que su aplicación mejora la gestión de recursos y

disminuye el manejo prolongado de pesticidas y plaguicidas principalmente, contribuyendo a la preservación del ambiente.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el ingreso de las tecnologías (WSN) en el sector agrícola aún está en su etapa inicial. Sin embargo la importancia de la aplicación en este sector radica principalmente en los diferentes ambientes en los que puede ser utilizada: el cultivo a cielo abierto y el cultivo protegido. Este último es el más explorado debido a que permite obtener producciones de primera calidad y mayores rendimientos en el producto en cualquier momento del año, a su vez alarga el ciclo de cultivo, permitiendo producir en las épocas más difíciles. Sin embargo para obtener estas producciones se requiere de la experiencia del agricultor, la cual es preciosa y precisa (Jarvis, 1998). Lo anterior debido a que los invernaderos no ofrecen protección contra plagas de insectos y otros patógenos. Aún cuando es posible que se consigan cosechas exentas totalmente de pesticidas, debido al apoyo en el control biológico de los insectos y el control ambiental de las enfermedades, se requiere más que la experiencia para llegar a una verdadera cosecha libre de plagas, enfermedades y cualquier tipo de recurso que afecte el cultivo.(Jarvis, 1998).

Entonces, tanto la experiencia del agricultor como el uso de la tecnología pueden erradicar las afecciones en los cultivos del sector agrícola, por lo menos en el desarrollo de plagas y enfermedades. Dejando atrás el control por medio de recursos que hasta el momento causan pérdidas y daños a los recursos naturales (agua, suelo), así como en el fruto.

II.3.2 Problemática actual en el campo agrícola

Las investigaciones que surgen en el sector agrícola, son la respuesta al aumento de los costos en el mantenimiento de un cultivo, y el ingreso de nuevas tecnologías. Las WSN, son una de las herramientas tecnológicas más utilizadas para experimentos en este sector. Estas presentan dos limitantes para su desempeño, por una parte se tiene el costo de su

ingreso en el sector agrícola y por otra parte se encuentra la ausencia de conocimiento por parte de los usuarios finales, tales como los agricultores.

Entonces, desde el punto de vista de aquella persona que labora en el sector agrícola (pequeña o mediana empresa), específicamente aquellos agricultores que no han tenido la oportunidad de interactuar con aplicaciones derivadas del uso de WSN, se puede observar que la técnica más sencilla para obtener información de su cultivo es, por ejemplo para verificar el riego, realizar huecos a los costados de cada fila del cultivo, y de esta forma observar la cantidad de humedad que se tiene en esa área.

Lo mismo sucede al explorar las técnicas que utiliza el agricultor, al resolver problemas de plagas y enfermedades en su cultivo. Si en un período anterior a su cosecha, se presenta cierta plaga o enfermedad, y del cultivo obtiene un porcentaje aceptable de producción con la aplicación de cierto químico, es muy probable que lo vuelva a utilizar, pero ahora en grandes cantidades, para “incrementar” la producción. Sin tomar en cuenta el daño que se genera en el suelo y agua, además de su propia producción.

Estos ejemplos muestran la utilización de una serie de técnicas empíricas tanto en el cuidado del cultivo, como en el uso de los recursos (agua, suelo, químicos), y como su uso afecta considerablemente el desarrollo del campo agrícola.

Finalmente, es importante reconocer que el incremento en los apoyos al campo agrícola en nuestro país crece de forma muy lenta. Como muestra de ello en la tabla 1 se observa, que en otros países no solo apoyan económicamente al sector agrícola, sino que además se realizan una serie de actividades, como los Agrow Awards-2009⁶ para incentivar a las pequeñas y grandes empresas a participar en desarrollos a este sector.

⁶ <http://www.agrowawards.com> (The premier showcase for excellence Crop Protection and Production Industry).

Tabla 1: Lista de industrias seleccionadas para los premios Agrow Awards, Londres Inglaterra 2009.

INDUSTRIA	URL
AgChem Access	www.agchemaccess.com
AgriGuard	www.agrowawards.com
Arysta LifeScience	www.arystalifescience.com
CropLife International	www.croplife.org
Exworld Tecnology	www.exwold.com
Indofil chemicals company	www.indofilcc.com
Nutrichem	www.agrowawards.com
Pi Plantimpact	www.plantimpact.com
Redsun Group	www.agrowawards.com
Safapac	www.safapac.co.uk
Syngenta	www.syngenta.com
Hermanu Group	www.hemanigroup.com
Widecover	www.widecover.com

II.3.3 Aplicaciones de modelos predictivos en el sector agrícola

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones como resultado de las investigaciones en el sector agrícola.

Herrero et, al, (2007), presenta un modelo robusto para la identificación no lineal de cultivos en un invernadero, usando algoritmos predictivos. En donde estos dependen directamente del clima que se presenta en las diferentes áreas geográficas. Así mismo propone un modelo de identificación robusta (RI), el cual es abordado por métodos estocásticos, en donde, aún cuando se tiene una incertidumbre alta, son los más adecuados para obtener un conjunto de posibles parámetros que resultan necesarios para el funcionamiento adecuado del modelo en general. Finalmente muestra las capacidades de la metodología propuesta mediante el modelo RI, alimentando el modelo con datos reales obtenidos en un verano en zonas mediterráneas. El resultado que se destaca es la flexibilidad para las normas aplicadas, en relación a la temperatura interior y la humedad.

Ameur et.al, (2001), aborda el monitoreo de invernaderos desde la perspectiva del uso de microcontroladores con una herramienta de software, diseñada para gerenciar los datos recolectados. Esta investigación se destaca por su versatilidad y su portabilidad. Entre los parámetros utilizados, nuevamente encontramos, como base, aquellos relacionados con las condiciones climatológicas. La parte práctica se desarrolla en un invernadero, donde se tiene un cultivo de bananas y el objetivo principal de esta investigación es el desempeño del microcontrolador en este ambiente y como responde a las condiciones ambientales en las que se encuentra, además del análisis en base a la respuesta del modelo presentado.

Ghoumari et al, (2005), desarrolla un modelo de control predictivo (MPC) para el control de la temperatura de un invernadero, utilizando tres de parámetros climatológicos, como lo son: Temperatura, humedad y CO₂. Entre sus aportaciones presenta la importancia de la utilización de nuevas técnicas de control avanzado en la regulación de procesos, principalmente en invernaderos. Así el modelo obtiene transparencia, sencillez y rentabilidad económica entre sus principales ventajas.

Wang et. al., (2008), describe a los parámetros ambientales de los cultivos protegidos, como la clave para una mayor automatización y eficiencia de los mismos. Su principal aportación del diseño es tanto el hardware como el software de una WSN para resolver los problemas relacionados a las condiciones climatológicas de invernaderos, así como la gerencia de la seguridad de los datos, la energía de los nodos y el comportamiento del modelo para ser utilizado en otros entornos como la industria.

Entre los desarrollos presentados en México, se destacan SIMPEC y SIPPEM. Ambos fueron diseñados para ofrecer información útil de los principales factores climáticos que afectaban un cultivo, lo anterior se realizó con el objetivo de apoyar a los usuarios en la toma de decisiones, una vez que se da inicio a un cultivo.

SIMPEC⁷ es un sistema inteligente para la predicción de plagas y enfermedades en el cultivo del jitomate. El cual por medio un conjunto de modelos integrados en un sistema experto, cuya base del conocimiento está basada principalmente en las variables aplicadas a técnicas de razonamiento deductivo, emite una predicción de alerta de los niveles de población de una plaga y el diagnóstico del mismo.

Por su parte SIPPEM⁸ está más enfocado al tratamiento del potencial ecológico en los cultivos por medio de un monitoreo constante de los cultivos. Su característica principal, es un diseño estructural con el cual ofrece al usuario una base de datos y cálculos que logran aproximar los valores de la escases de humedad en el cultivo, aproximación en el crecimiento, y valoración de la calidad del producto mediante datos ingresados por el usuario, lo cual lo hace más adaptable a las características de la región. Actualmente SIPPEM continúa expandiéndose para ofrecer más beneficios y contribuir con los desarrollos al campo agrícola.

Cárdenas Tamayo (2008), ofrece otra de las herramientas de apoyo para las actividades que se realizan en el sector agrícola, la toma de decisiones y crecimiento del cultivo. Para lo cual implementó un sistema de software prototipo para el apoyo en las tareas de fertirrigación y estimación del crecimiento de un cultivo. Su herramienta principal fue el uso de WSN, con la que obtuvo el registro de parámetros tales como, humedad y temperatura principalmente. Es importante mencionar la exploración que realizó en el campo agronómico para lograr una mayor precisión de las predicciones de crecimiento, y fundamentar sus resultados.

⁷ <http://www.producemich.org.mx>

⁸ <http://www.cinstrum.unam.mx/secciones/depar/sub4/sinte/sint.html> (Kemper y Ochoa Toledo).

II.4 Análisis de métodos predictivos

Existen varias formas de realizar predicciones, sin embargo éstas dependen del tipo de problema que se presente. Los métodos utilizados para la predicción de plagas y enfermedades para el modelo que se desarrolló, son principalmente el resultado de la exploración de dos áreas: algoritmos (evolutivos) y redes neuronales (backpropagation). De los cuales se determinó que se utilizaría este último, debido a las necesidades presentadas por el tipo de parámetros utilizados. Sin embargo es posible utilizar ambos métodos, esto dependerá del tipo de parámetro que se agregue, ya que cada uno corresponde a diferentes grados de complejidad en el modelo predictivo. En esta sección se muestra una descripción de ambos métodos. Además se muestran algunas de las actividades en el sector agrícola en relación a los desarrollos tecnológicos usando WSN.

II.4.1 Algoritmos predictivos

Los métodos tradicionales utilizados para el manejo de datos eran muy complejos debido a la robustez de los mismos (Fayyad, 1996). Debido a ésta situación, el análisis y la interpretación de los datos no contaba con una base sólida. Para resolver la complejidad de los problemas del manejo de datos, fue necesario introducir nuevas herramientas, metodologías y técnicas que sirvieran de apoyo. La extracción de modelos predictivos que frecuentemente es utilizado en el método de la minería de datos, para el cual se tienen dos enfoques característicos de los algoritmos: la precisión y la interoperabilidad (Cano et. al., 2005).

Entre los algoritmos que destacaron durante la revisión de la literatura, son los que se muestran en la Tabla II, en donde se observan las principales características de los algoritmos utilizados por los diferentes autores, en sus respectivos modelos predictivos. La finalidad de esta tabla es mostrar los algoritmos de acuerdo a sus características, para una mejor elección de los mismos.

Tabla II: Observaciones del comportamiento de algoritmos de predicción.

Autor	Algoritmo utilizado	Operación	Precisión	Simplicidad	Interoperabilidad
Pohlheim H. et al, 1997.	MECEA ESEA	Predicción de estrés del clima	Medio	Alto	Alto
Cano et al, 2005.	C4.5, variantes CHC1 y CHC2	Control optimo	Alto	Alto	Alto
Herrero, et al 2007.	E-GA caracterización	Modelo exploratorio	Alto	Medio	Medio

Dentro del contexto de algoritmos evolutivos, el aprendizaje es formulado como un problema de optimización. Dada una topología fija, el entrenamiento de una red neuronal puede ser visto como un proceso de optimización cuyo objetivo es encontrar un conjunto de pesos que minimice el error que produce la red sobre el conjunto de datos de entrenamiento. Esto convierte a los algoritmos evolutivos en una alternativa para métodos de entrenamiento tradicionales, ya que son capaces de no quedar atrapados en mínimos locales y al avanzar hacia una solución mediante operadores genéticos, además pueden aumentar la velocidad de convergencia a la solución (Bertona, 2005).

El cómputo evolutivo es la rama de la inteligencia artificial que engloba a todas aquellas técnicas de resolución de problemas basadas en la evolución de las especies y la supervivencia del más apto. Dentro de ella se encuentran los algoritmos genéticos, las estrategias evolutivas y la programación evolutiva, entre otros. Las técnicas evolutivas han sido aplicadas con éxito a distintos tipos de problemas como optimización de parámetros, planificación de tareas, diseño, etc. Estos algoritmos codifican las posibles soluciones al problema, mediante la aplicación de un conjunto de operadores genéticos, sobre la

población que después se va refinando gradualmente hasta que la solución alcance un resultado que cumpla con las condiciones requeridas.

II.4.2 Funcionamiento de un algoritmo

La aplicación de un algoritmo genético consiste en la generación de una población inicial, generalmente de manera aleatoria, además el tamaño de dicha población se compone de individuos. Una vez generada la población se debe evaluar la aptitud de cada individuo. Al decidir cuales individuos (muestras), contribuirán en la formación de la próxima generación, es el turno del operador (algoritmo) para continuar con este procedimiento de selección. Este mecanismo simula el proceso de selección natural, mediante el cual solo los individuos mas adaptados al ambiente se reproducen. El mecanismo de selección forma una población intermedia, que está compuesta por los individuos con mayor aptitud de la generación actual.

En la fase de operación del algoritmo, se aplican los operadores genéticos. Una vez que se cruza el primero de ellos y la función de recombinar el material genético, se toman aleatoriamente dos individuos que hayan sobrevivido al proceso de selección y se recombina su material genético, creando uno o más descendientes que pasan a la siguiente población. Este operador se aplica hasta formar una nueva población.

Finalmente se aplica el operador de mutación, el cual generalmente actúa con baja probabilidad, modifica algunos genes del cromosoma, posibilitándolo de esta manera para la búsqueda de soluciones alternativas. Tras cada iteración de este algoritmo la calidad aumenta y los individuos representan mejor el problema.

El algoritmo genético canónico, que se describió anteriormente, es la forma más utilizada para resolver problemas de proporciones mayores. Sin embargo en algunas

implementaciones es necesario agregar nuevos operadores, siempre dependiendo de las necesidades del problema.

II.4.3 Observaciones de algoritmos predictivos

Existen diferentes alternativas para tratar los modelos predictivos utilizando algoritmos evolutivos, sin embargo es necesario contar con los conceptos de eficiencia y eficacia al elegir el tipo de aprendizaje. A continuación se muestran algunas aplicaciones basadas en este método:

Para obtener mayor control en un cultivo protegido, se han desarrollado algoritmos que apoyen una de las principales tareas que se presentan en un invernadero, como lo es el control del clima. Para ello (Pohlheim H y Heißner A., 1997), desarrolló un modelo para el control óptimo del clima de un invernadero utilizando algoritmos evolutivos. Su base principal fue resolver pequeñas tareas tales como el control de la ventilación, control de luz para el crecimiento de las plantas, entre otros. Con ello resolvía en menor tiempo una serie de actividades que de no realizarlas en el tiempo preciso, se veía afectado el cultivo.

Otro trabajo de investigación es el que nos presenta Cano (2005), en donde muestra la extracción de modelos predictivos e interpretables en conjuntos de tamaño grande, mediante la selección de un conjunto de entrenamiento. El objetivo era comparar y evaluar varios algoritmos, tales como el C4.5, CHC1 y CHC2 entre los más destacados (Tabla II). Los resultados presentados demostraron que estos algoritmos contaban con mayor precisión, simplicidad e interoperabilidad para su uso y comprensión de quien los trabaja. Además se presenta una herramienta llamada KEEL (Alcala-Fdez et. al., 2008), la cual utiliza diversos algoritmos para el tratamiento de los datos y ofrece una mayor comprensión para el manejo de estos. KEEL es un sistema que comparte características con su homólogo

WEKA⁹, sin embargo ofrece, entre otras cosas, más algoritmos para resolver problemas de minería.

De las investigaciones mencionadas anteriormente, se observan ciertos factores que influyen en el proceso de desarrollo de cada proyecto, y en especial la robustez que representa la utilización de las técnicas utilizadas por la minería de datos. Sin embargo se tienen alternativas para reducir las labores de minería de datos y concentrarse en los algoritmos que se desean utilizar, tal como lo muestra (Cano, 2005).

II.4.4 Algoritmos predictivos con aplicaciones en el campo agrícola

A continuación se mencionan las aplicaciones de los algoritmos evolutivos en el campo:

- Pohlheim H., y Heißner A., (1997), presentan un sistema para mantener un control óptimo dentro de un invernadero. En el modelo integrado se muestran los parámetros de crecimiento de los cultivos, el margen de las condiciones meteorológicas y equipos de control predice la temperatura, así como la humedad del aire y la concentración de CO₂ en un intervalo de tiempo de 15-60 minutos.

El objetivo es maximizar los beneficios bajo ciertas limitantes en relación al estrés que se produce en los cultivos. Los algoritmos evolutivos reaccionan mejor para resolver este tipo de problemas en un tiempo muy corto.

En la figura 2, se muestra el modelo general de los parámetros y la relación con los cálculos que Pohlheim y Heißner describen.

⁹ <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

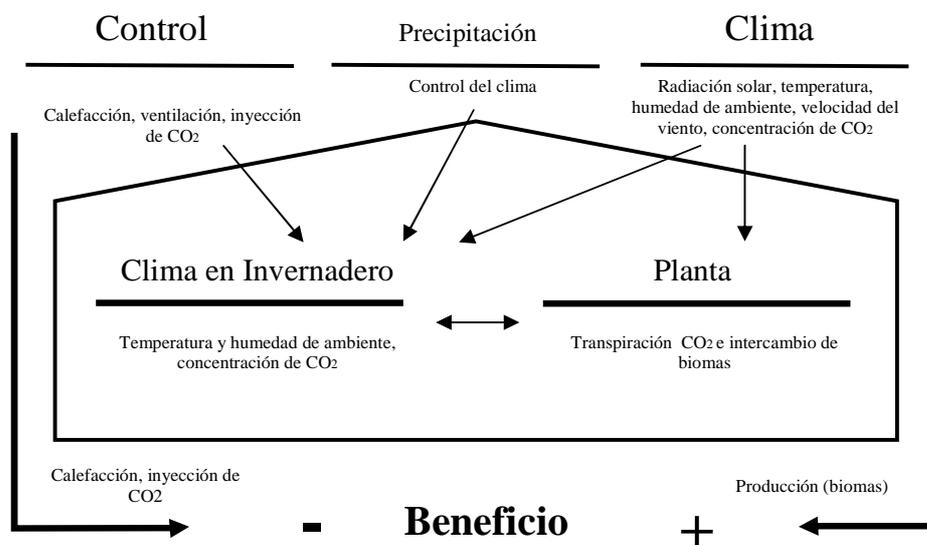


Figura 2: Modelo de cálculo de los parámetros dependientes.

- Herrero (2007), describe un modelo climático para un invernadero basado en los modelos no lineales. Debido a que se requiere un mayor control dentro de un invernadero, Herrero muestra un modelo robusto en el cual se incluyen la mayoría de los parámetros que están involucrados en el cuidado de los cultivos de los invernaderos. El algoritmo que utilizó es el ϵ -GA que es una estrategia evolutiva, la cual almacena un conjunto mínimo de soluciones para tomar parte activa del algoritmo. En la figura 3, se muestra el modelo climático general que Herrero presenta.

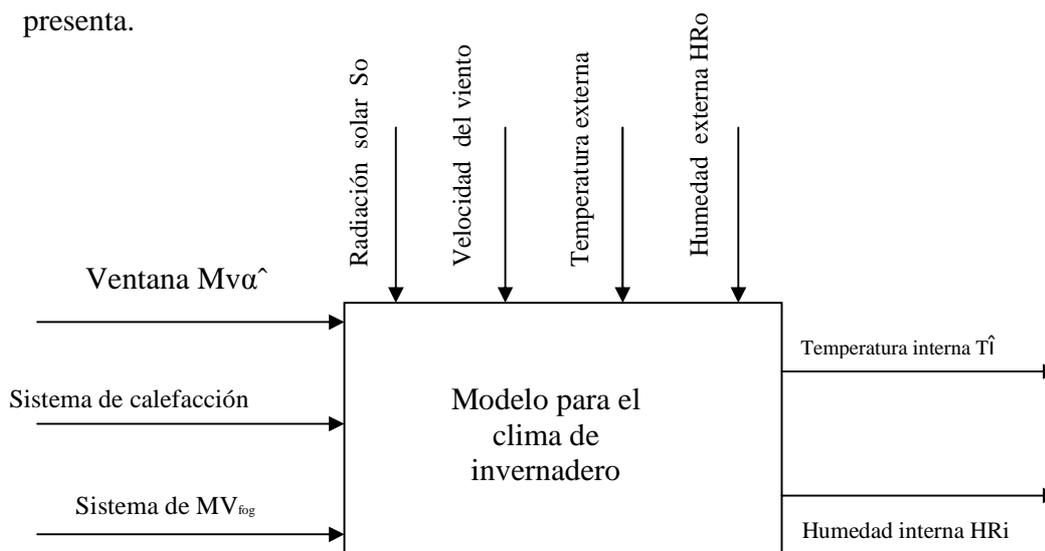


Figura 3: Modelo climático para invernadero.

II.5 Redes neuronales

Las redes neuronales son otra alternativa para resolver una gran diversidad de problemas que se presentan en la vida diaria, y con aplicaciones en cualquier área (Linker y Sengier, 2003). Debido a su flexibilidad para resolver problemas a diferentes niveles (capas) dependiendo de la complejidad del problema, las redes neuronales se han aplicado con éxito en problemas relacionados al sector agrícola. En los sistemas de control de temperatura dentro de un invernadero, es posible realizar modelos híbridos de predicción es decir, utilizar diferentes técnicas de redes neuronales con el objetivo de optimizar el modelo predictivo. La complejidad que presenta por los diversos parámetros para el estudio, provocan que generalmente las investigaciones coincidan en ciertos parámetros básicos de los factores climatológicos.

II.5.1 Elementos de una red neuronal

Las redes neuronales artificiales (RNA), se consideran modelos matemáticos que intentan reproducir el funcionamiento del sistema nervioso. Como todo modelo realizan una simplificación del sistema real que simulan y toman las características principales del mismo para la resolución de una tarea determinada.

Una red neuronal consiste en un conjunto de elementos de procesamiento, llamados neuronas, los cuales se conectan entre sí. La organización y disposición de las neuronas dentro de una red neuronal se denomina topología, y viene dada por el número de capas, la cantidad de neuronas por capa, el grado de conectividad, y el tipo de conexión entre neuronas.

Una vez determinada la topología de la red neuronal es necesario entrenarla. En la etapa de entrenamiento, la red es capaz de aprender relaciones complejas entre entradas y salidas mediante el ajuste de pesos de las conexiones entre neuronas. Los algoritmos de

entrenamiento en su mayoría utilizan información del gradiente de una función de error para ajustar los pesos de las conexiones, y se les llaman algoritmos de gradiente descendente (Bertona, 2005; Sanz Bobi y Besada Juez, 2000).

Hay tres tipos de neuronas:

- 1.- Neuronas de entrada: las que reciben información directamente del exterior.
- 2.- Neuronas ocultas: las que reciben información desde otras neuronas artificiales, en donde su sinapsis realiza la representación de la información almacenada.
- 3.- Neuronas de salida: las que reciben la información procesada y la devuelven al exterior.

En la figura 4, se muestran los elementos que componen una neurona artificial.

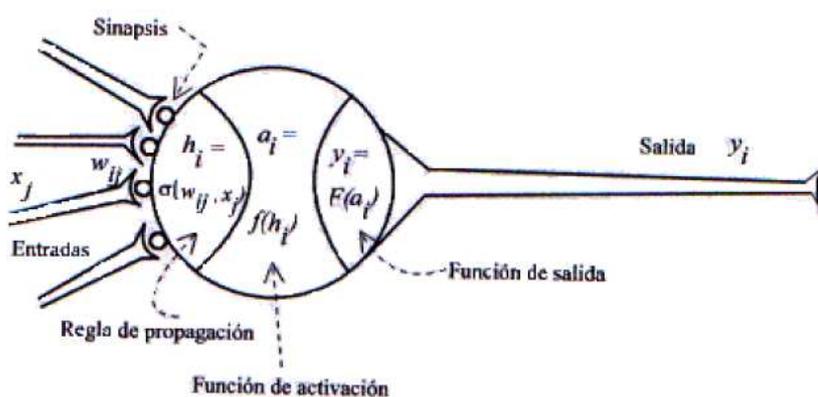


Figura 4: Elementos de una neurona artificial.

Conjunto de entradas, $x_j(t)$. Estas pueden ser provenientes del exterior o de otras neuronas artificiales.

- **Peso sinápticos, w_{ij} .** Representan el grado de comunicación entre la neurona artificial j y la neurona artificial i . Pueden ser excitadores o inhibidores.
- **Regla de propagación, $\sigma(w_{ij}, x_j(t))$.** Integra la información proveniente de las distintas neuronas artificiales y proporciona el valor del potencial postsináptico de la neurona i .

- **Función de activación, $f_i(a_i(t-1), h_i(t))$.** Provee el estado de activación actual de la neurona i .
- **Función de salida, $F_i(a_i(t))$.** Representa la salida actual de la neurona i . Donde las salidas y entradas pueden ser clasificadas como binarias (digitales) o continuas, la selección del tipo de neurona depende de la aplicación y del modelo a construir.

El peso sináptico w_{ij} define la fuerza de una conexión sináptica entre dos neuronas, la neurona presináptica i y la neurona postsináptica j . Los pesos sinápticos pueden tomar valores positivos, negativos o cero. En caso de una entrada positiva, un peso positivo actúa como excitador, mientras que un peso negativo actúa como inhibidor. En caso de que el peso sea cero, no existe comunicación entre el par de neuronas. Mediante el ajuste de los pesos sinápticos la red es capaz de adaptarse a cualquier entorno y realizar una determinada tarea.

La regla de propagación determina el potencial resultante de la interacción de la neurona i con las N neuronas vecinas. Por su parte la función de activación determina el estado de activación actual de la neurona en base al potencial resultante h_i y al estado de activación anterior de la neurona $a_i(t-1)$.

Finalmente en la función de salida proporciona el valor de salida de la neurona, en base al estado de activación de la neurona. En la tabla III se muestran algunas de las funciones de activación:

Tabla III: Funciones de activación

Función	Fórmula	Rango
Identidad	$y = x$	$[\infty -\infty]$
Escalón	$y = +1$ si $x \geq 0$, 0 si $x < 0$	$[0,1]$
	$y = +1$ si $x \geq 0$, -1 si $x \leq 0$	$[-1,1]$
Lineal a tramos	$y = x$ si $-1 \leq x \leq 1$, $+1$ si $x > 1$,	$[-1,1]$
	-1 si $x < -1$	
Sigmoidea	$y = 1 / (1 + e^{-x})$	$[0,1]$
	$y = \tanh(x)$	
Sinusoidal	$y = \sin(\varphi x + \omega)$	$[-1,1]$

II.5.2 Arquitectura de una red neuronal

Una vez definido el tipo de neurona que se utilizará en un modelo de redes neuronales artificiales, es necesario definir la topología de la misma. A la organización y disposición de las neuronas dentro de una red neuronal se le denomina topología, y viene dada por el número de capas, la cantidad de neuronas por capa, el grado de conectividad, y el tipo de conexión entre las neuronas. Las neuronas suelen agruparse en unidades funcionales denominadas capas. Una red neuronal puede estar compuesta por una o más capas interconectadas entre sí.

Durante el proceso de operación dentro de una red neuronal podemos distinguir claramente dos fases o modos de operación: la fase de aprendizaje, en donde la red es entrenada para realizar un determinado tipo de procesamiento.

II.5.3 Aprendizaje

En la fase de operación en donde encontramos tres grandes grupos, de acuerdo a sus características.

- Aprendizaje supervisado: es en donde la red presenta un conjunto de patrones de entrada junto con la salida esperada. Los pesos se van modificando de manera proporcional al error que se produce entre la salida real de la red y la salida esperada.
- Aprendizaje no supervisado: es aquel que presenta a la red un conjunto de patrones de entrada. No hay información disponible sobre la salida esperada. El proceso de entrenamiento en este caso debería ajustar sus pesos en base a la correlación existente entre los datos de entrada.
- Aprendizaje por refuerzo: Este tipo de aprendizaje se ubica en medio de los otros dos. Es útil en aquellos casos en que se desconoce cuál es la salida exacta que debe proporcionar la red.

II.5.4 Fase de operación

Una vez finalizada la fase de aprendizaje, la red puede ser utilizada para realizar la tarea para la que fue entrenada. Una de las principales ventajas que posee este modelo es que la red aprende la relación existente entre los datos, adquiriendo la capacidad de generalizar conceptos. De esta manera, una red neuronal puede tratar con información que no le fue presentada durante la fase de entrenamiento.

II.5.5 Entrenamiento de redes neuronales

El proceso de aprendizaje es un proceso iterativo, en el cual se va refinando la solución hasta alcanzar un nivel de operación suficientemente bueno. La mayoría de los métodos de entrenamiento utilizados en las redes neuronales con conexión hacia adelante, en donde este se caracteriza por su organización en capas y conexiones estrictamente hacia adelante, además de su entrenamiento supervisado, consisten en proponer una función de error que mida el rendimiento actual de la red en función de los pesos sinápticos que minimizan o maximizan la función.

II.5.6 Algoritmo Retropropagacion (Backpropagation)

Este es el método de entrenamiento más utilizado en redes con conexión hacia adelante. Es un método de aprendizaje supervisado de gradiente descendente, el cual se define como una función $E(W)$ que proporciona el error que comete la red en función del conjunto de pesos sinápticos W , en el que se distinguen claramente dos fases: primero se aplica un patrón de entrada, el cual se propaga por las distintas capas que componen la red hasta producir la salida de la misma. La cual es comparada con la salida deseada y se calcula el error cometido por cada neurona de salida. Estos errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de las capas intermedias. Cada neurona recibe un error que es proporcional a su contribución sobre el error total de la red, basándose en el error recibido, y se ajustan los errores de los pesos sinápticos de cada neurona.

Este algoritmo fue utilizado en el presente trabajo debido a la adaptabilidad del comportamiento de este en relación al comportamiento de los parámetros utilizados en esta investigación. En el capítulo III se muestran las reglas utilizadas, el comportamiento y la evaluación del modelo.

II.5.7 Redes neuronales con aplicaciones en el sector agrícola

Una de las aplicaciones tecnológicas más sobresalientes en el sector agrícola es la presentada por Linker (2003), la cual se describe a continuación.

En el clima de un invernadero influyen: el ambiente externo y la dependencia de la recopilación y análisis de datos, con un tiempo mínimo de un año. Lo cual sugiere ciertos errores en las predicciones de las condiciones climáticas, ya que se requiere de información histórica. Para ello Linker realizó una comparación del rendimiento de tres tipos de modelos y subconjuntos de datos, como lo son: 1.- black box (BB, por sus siglas en inglés) utilizando sigmoide con datos in situ, 2.- modelo híbrido de radial función base (RBF por sus siglas en inglés), 3.- Red neuronal sigmoide entrenada con la combinación de datos in situ y sintéticos.

Linker encuentra que el modelo sigmoide BB (figura 5), ofrece el mejor modelo de predicción y los dos restantes tienen predicciones útiles pero no tan exactas. Los parámetros utilizados fueron: temperatura exterior, radiación solar exterior, ventilación, humedad exterior, temperatura interna, entre otros.

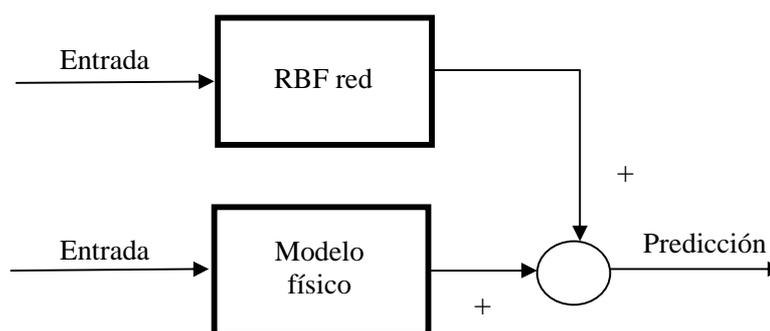


Figura 5: Modelo híbrido-paralelo.

II.6 Actividades en el sector Agrícola

Para incrementar la eficiencia del uso de recursos durante la producción, principalmente para el apoyo de la toma de decisiones, existen diversas tecnologías como, la agricultura de precisión; misma que se encarga de la gestión de los cultivos y la variabilidad del suelo para aumentar el rendimiento económico y reducir el impacto ambiental (Blackmore y Griepentrog, 2002). Entre las principales área para el cuidado de los cultivos se encuentra: El monitoreo del cultivo, la caracterización del suelo y del agua, el uso adecuado de los fertilizantes en la nutrición de los cultivos y la reducción del impacto ambiental (Cárdenas Tamayo, 2008).

Para un monitoreo constante de los cultivos, se requiere hacer una inspección de rutina en la que se verifique si hay presencia de las plagas o enfermedades, aunque también sirve para observar la humedad del cultivo para aquellos casos en los que no se cuenta con un sistema de riego automático. Sin embargo en ambas situaciones se requiere un lapso de tiempo extenso, y los resultados solo muestran el grado de avance de una plaga o enfermedad.

En el mercado existe una gran variedad de dispositivos para la supervisión del cultivo, algunos de ellos son los proporcionados por las compañías como: Crossbow, Climatecontrol, y Dexmatech, por mencionar algunas de ellas. A continuación se describen algunos de ellos.

II.6.1 Monitoreo de cultivos

Los equipos de monitoreo proveen desde sensores para obtener la humedad de una hoja, hasta equipos de fertirrigación completos, además de equipos de WSN que ofrecen un monitoreo constante en el cultivo.

II.6.2 Equipos de monitoreo en el mercado

Si bien es cierto que las WSN son una de las tecnologías más utilizadas para resolver problemas en una amplia área de aplicación, hoy por hoy se han logrado avances significativos en el desarrollo de aplicaciones en el campo agroindustrial. Quizá no con la rapidez suficiente para ofrecer soluciones oportunas a las necesidades que se presentan, pero sin duda alguna proporcionan a largo plazo herramientas que contribuyen a resolver problemas que aquejan tanto a empresarios como a productores de pequeñas y grandes empresas. Lo anterior considerando la trayectoria que llevan estas tecnologías, los costos de las mismas, disminuirán para que se realicen aplicaciones no solo en las áreas mencionadas sino también en aquellas que aún no se han explorado.

Gran parte de las aplicaciones que se generan a partir de las investigaciones relacionadas a las WSN, son problemas que tienen su origen en el sector agrícola, los cuales tienen el objetivo de optimizar los métodos para la elaboración de los diversos productos provenientes de este sector (Ahmed et, al., 1995; Goumari et, al., 2005). Paralelamente se desarrollan herramientas y técnicas para minimizar el impacto que la escasez de agua tiene en el campo y enfrentar los problemas de plagas y enfermedades que aquejan a este sector.

A continuación se describen tres equipos de monitoreo, siendo el primero el utilizado para la investigación de campo.

II.6.2.1 Eko Pro Series

Crossbow, con su producto Eko Pro Series¹⁰ ha tenido un gran impacto en el mercado, no solo por la calidad de su producto, sino también por el apoyo que se otorga al usuario, en relación a los principales factores que afectan a los diferentes cultivos en el sector agrícola.

¹⁰ <http://www.xbow.com/eko/Images/-ekobrochureCrossbow.pdf>

Formado por una WSN, el sistema Eko es fácilmente adaptable al tratar de cubrir las necesidades de supervisión dentro de la ciencia ambiental, abarcando áreas tales como, el cambio de clima, la conservación, biodiversidad, calidad del agua, la contaminación el agua subterránea, contaminación del suelo, uso de recursos natural, gestión de desechos, desarrollo sostenible y contaminación atmosférica.

El kit de desarrollo presentado por Crossbow, que se muestra en la figura 6, y que es parte del equipo que se utilizó en este trabajo, está diseñado para obtener parámetros de suelo y ambiente, por medio de los siguientes dispositivos.

- 3 nodos, eN2100.
- 1 sensor de temperatura ambiental y de humedad, eS1201.
- 1 base radio, eB2110.
- 6 sensores de humedad y temperatura de suelo eS1101.
- Y una placa Gateway eG2100.

Por medio de este equipo es posible obtener parámetros tales como la humedad y temperatura de suelo y ambiente. Además proporciona una herramienta de software por medio de la cual se pueden visualizar en tiempo real el comportamiento de los parámetros mencionados anteriormente. Sin embargo carece de alertas de plagas o enfermedades en cultivos, además que el usuario debe estar continuamente graficando los datos que desea visualizar, esto se debe a la falta de actualización en los mismos.

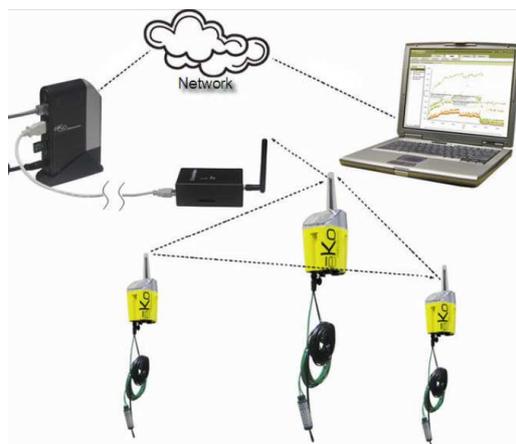


Figura 6: Red inalámbrica de sensores, Eko Pro Series de Crossbow.

II.6.2.2 Climatecontrol

Esta compañía ofrece diversos productos para su uso en invernadero. Entre sus equipos más destacados se encuentra, The Climate Manager¹¹. El cual ofrece un monitoreo constante del cultivo dentro de un invernadero, para lo cual utiliza sensores que recopilan información como, humedad y temperatura ambiental.

El objetivo es establecer una comunicación constante con el usuario, y para ello se incluye un equipo completo de cómputo, que se muestra en la figura 7, en donde por medio de una herramienta visual es posible detectar los incrementos o decrementos en los parámetros mencionados anteriormente. Existen otro tipo de dispositivos tales como el sensor de humedad, este se debe colocar cerca de la hoja para conocer estos valores. Sin embargo se puede observar que los dispositivos son muchos y pueden aumentar la complejidad para el usuario final.

¹¹ <http://www.climatecontrol.com/climatemanager.html>

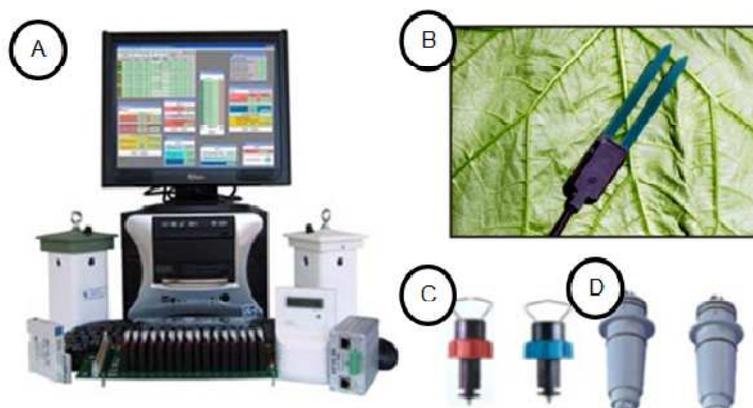


Figura 7: A) Sistema para el control del clima en invernaderos. B) Sensor de humedad para hoja. C) y D) Sensores para medir el flujo del agua y el pH, respectivamente

II.6.2.3 Dexmatech (DexCell)

Dexmatech¹² ofrece entre sus productos, DexCell que es un software para la monitorización con redes inalámbricas de sensores. Por medio de ella se permite captar y conectar parámetros como temperatura, humedad, luminosidad y consumo energético, entre otros. Las aplicaciones son muy completas, en la agricultura encontramos productos como micro –estaciones de monitorización ambiental, como la que se muestra en la figura 8, por medio del cual se pueden medir parámetros como: temperatura y humedad ambiental, humedad de suelo, captador de desplazamiento (variaciones de tronco), radiación solar, humedad de hoja. Sin embargo, hasta el momento no se cuenta con sensado para la temperatura de suelo.

¹² <http://www.dexmatech.com/productos>



Figura 8: Detalle de un nodo inalámbrico, desarrollado por Dexma.

II.7 Conclusiones

Para llevar a cabo el proceso de selección de la técnica que se va a utilizar para desarrollar un modelo predictivo, es necesario tomar en cuenta varios factores como lo son, el número de parámetros con los que se va a trabajar, delimitar el área a la que pertenece cada parámetro y conocer las diversas opciones que se ofrecen para el proceso predictivo. En el presente capítulo se muestran dos enfoques, algoritmos predictivos y redes neuronales. Ambos se encuentran como muestra de un proceso exploratorio dentro de estas áreas, sin embargo tiene el objetivo de mostrar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Por otra parte, en relación a los equipos de monitoreo que existen en el mercado, y la gran variedad de estos productos que prometen solucionar problemas en el sector agrícola, es importante conocer primero las necesidades de este sector y del agricultor, el problema que se presenta en el cultivo, los diferentes factores que lo provocan buscar alternativas para solucionar estos problemas y después elegir el equipo más conveniente. Así mismo es recomendable que las aplicaciones y dispositivos que se adquieran sean lo más transparente que se pueda al usuario, y que éste solo se preocupe por obtener la información que requiere y no como manejar el equipo.

Capítulo III

Definición del modelo predictivo para la predicción de plagas y enfermedades

III.1 Parámetros predictivos

Los cambios bruscos en las condiciones climatológicas afectan considerablemente las cosechas, tanto en campo abierto como en cultivos protegidos. En este último, el empleo de elementos de automatización para la apertura de las ventilaciones, de radiómetros que monitoreen el nivel lumínico al interior del invernadero, y la instalación de equipos de calefacción, es cada vez más frecuente. Debido a que los organismos causantes de estos problemas tienen la característica de regular su temperatura corporal, se encuentran expuestos a los cambios de temperaturas ambientales, por lo que su velocidad de desarrollo depende de éstas condiciones climatológicas, (López Collado, 2005). Por esta razón cuando los insectos causan daños en los cultivos y rebasan el nivel de daño económico (NDE), se produce un sistema inestable y desencadena ambientes propicios para el desarrollo de plagas y enfermedades en las plantas.

En base a las investigaciones recientes en el sector agrícola, se observa la necesidad de analizar cada uno de los parámetros que tienen influencia directa o indirectamente en el desarrollo de una planta y por lo tanto en las producciones agrícolas. Para buscar un modelo básico de estos parámetros, se analizaron algunas de las herramientas resultado de las recientes investigaciones y se encontraron algunas incidencias dentro de los parámetros utilizados en sus modelos predictivos. Los cuales se muestran en la siguiente sección.

III.2.1 Clasificación de los parámetros predictivos

Existe una gran variedad de parámetros alrededor de un cultivo, los cuales varían dependiendo de la profundidad de su estudio. Un ejemplo de estos parámetros son las condiciones climatológicas, en donde se encuentran, la humedad y temperatura tanto ambiental como de suelo. Lo mismo sucede con recursos como el agua y el suelo, así como diversos patrones de comportamiento los cuales influyen en el desarrollo de un cultivo. Debido a esto es difícil encontrar un modelo de predicción de plagas y enfermedades que cuente con todos o la mayoría de los parámetros mencionados anteriormente. Sin embargo es posible buscar los parámetros básicos, es decir, los primeros que influyen en cualquier alteración del cultivo, para que a partir de estos se elaboren los modelos de predicción de los cultivos.

En la tabla IV, se muestran las categorías de los parámetros más utilizados para desarrollar los diferentes modelos de predicción para aplicaciones en el sector agrícola. Cabe mencionar que se han organizado en grupos debido a que representan una gran variedad de parámetros dentro de ellos.

La clasificación de parámetros está dada por: condiciones climatológicas (CC), etapas fenológicas (E.F), agua, suelo, y funciones biológicas de la planta (F.B. Planta). Dentro del grupo de CC, podemos encontrar temperatura y humedad para suelo y ambiente. En E.F. se toman en cuenta las variables anteriores (CC) para cada una de las etapas fenológicas, que para el modelo se generalizaron a cinco etapas. La categoría de Agua, se refiere a todos los parámetros que se relacionan con las propiedades del agua, como; salinidad, toxicidad, pH, susceptibilidad de cambios bruscos de temperatura, entre otros. (He Young et, al., 2005).

De igual forma sucede con la categoría Suelo, que se refiere a las propiedades del suelo, tales como; tipo de suelo, nutrientes, salinidad y otros elementos.

Además se incluyen los parámetros como lo son el nivel del mar en el que se encuentra el cultivo.

Finalmente, la categoría de F.B. de la planta, se refiere a los procesos fisiológicos y biológicos de la planta, como; CO₂, grados día, entre otros. La razón por la cual se agrego el parámetro de Etapa Fenológica, se debe a la ausencia de la misma en las diferentes investigaciones, siendo esta una de las más importantes, debido a que los cambios biológicos de cada etapa.

Tabla IV: Parámetros utilizados en modelos predictivos.

Autores	Parámetros					
	CC	EF	Agua	Suelo	F. B. Planta	Otros
Wang et al.,2008	✓	-	✓	✓	✓	✓
Rodriguez et al.,2007	✓	-	-	✓	✓	✓
Pohlheim y Heißner.,1997	✓	-	-	-	✓	✓
Ameur et al., 2001	✓	-	-	-	-	✓
Herrero et al., 2007	✓	-	-	-	-	✓
Ehret et al., 2001	✓	-	-	-	-	✓
Linker y Seginer., 2003	✓	-	-	-	-	✓
Ghoumari et al., 2005	✓	-	✓	✓	✓	✓
Rodriguez et al., 2007	✓	-	-	-	✓	✓

Importancia de las etapas fenológicas en el modelo predictivo

Un cultivo que se siembra en diversas regiones, con diferentes climas puede presentar diferentes estados de desarrollo durante un mismo periodo de tiempo. Es decir, mientras un cultivo se encuentra en su primera etapa fenológica en un clima moderadamente frío, el mismo cultivo puede desarrollar su segunda o tercera fase fenológica en un periodo de tiempo para la primera etapa, en un clima moderadamente más cálido. Lo mismo sucede con las afecciones de enfermedades y la susceptibilidad a las plagas. De ahí la importancia del uso de etapas fenológicas que permiten a la vez, referirse a las observaciones y a las prácticas de manejo del cultivo en una etapa de desarrollo determinada.

Las etapas fenológicas se definen como el estudio de los fenómenos periódicos de los seres vivos y sus relaciones con las condiciones ambientales como la luz, temperatura, humedad, entre otros. Estas etapas son muy variables, es decir, existe diferente número de etapas fenológicas para cada cultivo, sin embargo es posible asociar las etapas y organizarlas en grupos reducidos, de esta forma resulta más sencillo identificar las etapas de los cultivos y realizar comparaciones entre dos cultivos que se ven afectados por las plagas y enfermedades. Sin embargo el número de estas últimas aumenta considerablemente y resulta complicado elegir de una lista cual es la de mayor riesgo para la planta en una determinada etapa fenológica.

En la figura 9 se muestra la relación entre las etapas fenológicas, el cultivo y las condiciones climatológicas, en donde se pueden desarrollar las plagas y enfermedades, independientemente del cultivo. Como se puede observar se debe considerar el comportamiento climatológico del cultivo en sus diferentes etapas fenológicas, ya que este representa los ambientes que propician el desarrollo las mismas.

Los factores climatológicos suelen coincidir con las condiciones óptimas del cultivo, lo cual genera una constante fricción entre ambos. De ahí la importancia de conocer las condiciones para el cultivo y sus respectivas plagas y enfermedades, de esta forma

incrementa el grado de precisión una vez que se utilizan estos parámetros para un modelo predictivo.

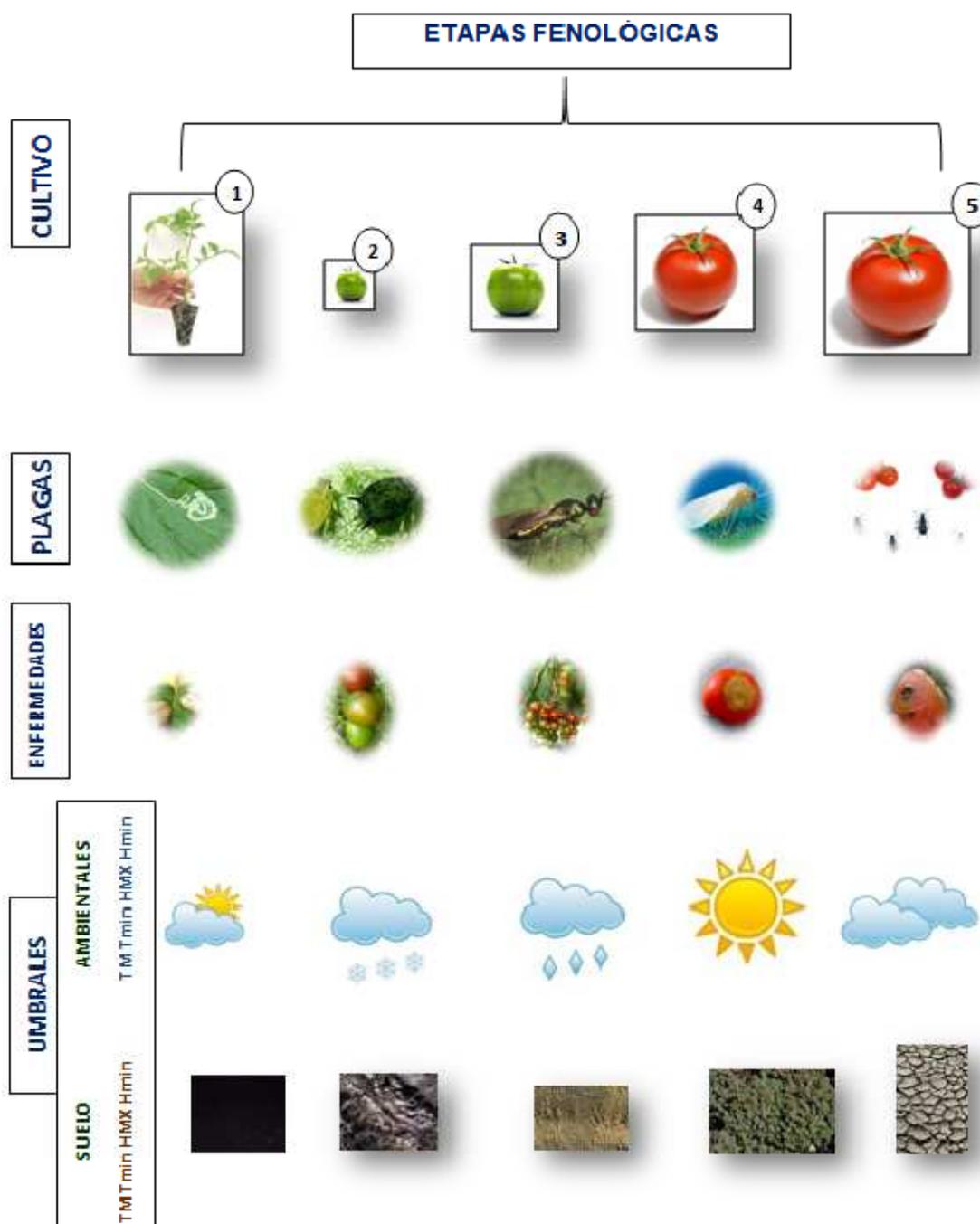


Figura 9: Relación entre las etapas fenológicas y los parámetros climatológicos.

III.2.2 Relación entre temperatura y humedad

¿Por qué utilizar parámetros climatológicos?

Las fases de crecimiento de los cultivos se ven condicionadas por cuatro factores ambientales o climáticos: temperatura, humedad relativa, luz, y nivel de dióxido de carbono. Estos factores se conjugan en diferente medida, para que las plantas puedan realizar sus funciones, y fuera de los cuales, cesa su metabolismo.¹³ (Shaxson F., y Baber R., 2005).

La humedad relativa es la cantidad de agua que está presente en un volumen de aire, en relación con la cantidad máxima admitida por ese volumen. La relación entre la temperatura y la humedad relativa es inversa, por lo tanto, a mayor temperatura, la capacidad de almacenar agua será menor. Este comportamiento se puede observar en la figura 10.



Cada especie tiene una humedad ambiental óptima para su desarrollo. Por ejemplo: el tomate, pimiento, berenjena, prefieren una humedad relativa (HR) de 50-60%, el melón 60-70%, el calabacín 65-80%, el pepino 70-90%. (Liu Jiping et, al., 2002).

¹³ <http://www.actividadesrurales.com/medio-rural/climatizacion-de-invernaderos.php>

Cuando la HR es excesiva, las plantas disminuyen su crecimiento por reducción en la transpiración, hay abortos florales por el apelmazamiento del polen, y una mayor aparición de enfermedades. En cambio, cuando la HR es muy baja, las plantas transpiran en exceso, y pueden deshidratarse, y cuajan mal. Para el control de la HR, está el higrómetro. La humedad excesiva, se puede reducir ventilando, aumentando la temperatura, y evitando la humedad excesiva del suelo. Para aumentar la humedad, se llena de agua las canaletas, y se pulveriza el ambiente con agua. Cuando el invernadero sobrepasa los 40m de ancho, es necesario establecer una ventilación central, sirve para controlar la temperatura y la humedad.

El comportamiento mencionado anteriormente, se presenta de forma similar en los cultivos a campo abierto, cuando las corrientes de aire cesan no hay suficiente HR para el que las plantas transpiren de forma habitual. Es entonces cuando inicia un aumento en la transpiración y aparecen las condiciones para el desarrollo de las diversas plagas y enfermedades. En el campo se tienen pocas probabilidades de presentarse este fenómeno de forma constante, a excepción de los lugares en los que se presentan climas extremos. Sin embargo es esta característica, de corrientes de aire, la que suele traer consigo partículas de enfermedades presentes en otros cultivos, o bien insectos que sean los portadores de dichas enfermedades.

La relación entre la temperatura y la humedad hacen de las condiciones climatológicas un factor básico para desarrollar un modelo predictivo, es por ellos que se presenta en gran parte de las investigaciones mencionadas anteriormente (tabla IV). Así mismo se observa la necesidad de incluir las etapas fenológicas en los cultivos, ya que estas se encuentran compartiendo junto con las condiciones climatológicas, las características principales para el desarrollo de los cultivos.

A continuación se muestran una serie de tablas en las cuales se encuentran los principales parámetros que se presentan específicamente en el tomate perita. La tabla VI, muestra algunas de las enfermedades relacionadas a este cultivo, entre las cuales se observó que además del nombre, la descripción de la enfermedad, la familia a la que corresponde, y de los parámetros de cada etapa fenológica (tabla V), es necesario conocer los síntomas que presenta la planta, la susceptibilidad de esta a una enfermedad, entre otros parámetros a considerar.

Tabla V: A) Parámetros de etapas fenológicas. B) Parámetros generales.

A) Etapas fenológicas							
Etapa 1							
Ambientales				Suelo			
Temp Max	Temp min	HR Max	HR min	Temp Max	Temp min	HR Max	HR min

Descripción	Síntomas	Daño	Nivel de susceptibilidad*		
			Bajo	Medio	Alto

Por otra parte en la tabla VII se observa que el comportamiento de las plagas es diferente, aun cuando comparten los parámetros de la tabla V, se debe conocer el tipo de plaga y la familia a la que pertenece, dos factores que hacen compleja la comprensión de cada una de las plagas, para su control y prevención de las mismas.

Es importante mencionar que el ingreso de los nematodos en la tabla VII se debe a la clasificación presentada por el suplemento especial de productores de hortalizas, 2006. Lo anterior debido al respaldo del IPM (National Information System).

Tabla VI: C) Caracterización de algunas enfermedades del cultivo tomate perita.

Familia	Nombre
Bacteriana	<i>Cancer bacteriano</i>
	<i>Mancha bacteriana</i>
	<i>Mancha negra</i>
	<i>Marchitez bacteriana</i>
Fungosas	<i>Antracnosis</i>
	<i>Cancer de tallo</i>
	<i>Cenicilla</i>
	<i>Fusarium</i>
	<i>Mancha gris</i>
	<i>Moho gris</i>
	<i>moho blanco</i>
	<i>Tizon temprano</i>
	<i>Tizon tardio</i>
Virales	<i>ToMV</i>
	<i>TYLCV</i>
	<i>TSWV</i>

Tabla VII: D) Familias que pertenecen a las plagas E) tipo de plagas.

		D) Familia			
		Chupadores	Masticadores	Minador	
E) Tipo	Insectos	Afifos/Pulgón			
		Mosca blanca			
		Paratrioza			
		Trips			
		Orugas			
		Gusanos			
		Minador de hoja			
		Afifos			
		Ácaros	Acado blanco		
			Araña roja		
Nematodos	Nematodo de raíz				

III.3 Modelo Predictivo (Base)

En el transcurso de cada etapa de crecimiento de una planta, desde la germinación, la semilla, hasta la madurez, son conocidas como etapas fenológicas. Debido a los múltiples parámetros que se observan durante estos periodos de tiempo, es necesario analizar cuáles son los que influyen en una primera instancia en el desarrollo de los cultivos. Así mismo se requiere conocer el tipo de cultivo y del área en donde se siembre. Sin embargo resulta complejo analizar cada uno de los factores que influyen en el comportamiento de las plantas durante su desarrollo.

Por este motivo se tomó como base principal un modelo predictivo, que cuenta con los parámetros como: las condiciones climatológicas (temperatura y humedad tanto de agua como de suelo), y etapas fenológicas del cultivo, sobre el cual se prevean las plagas y enfermedades en sus primeras etapas de desarrollo.

Por otra parte al considerar estos parámetros, también se observó que mientras se desarrolla un cultivo bajo sus condiciones óptimas de crecimiento para cada etapa fenológica, era posible que estas condiciones coincidieran con algunas de las plagas y enfermedades, por lo que la complejidad de la predicación aumenta. Sin embargo esta desventaja representa la influencia de las condiciones climáticas sobre los cultivos y las plagas y enfermedades relacionadas a este. De esta forma una vez que se conocen estas condiciones es necesario buscar las que correspondan a cada etapa fenológica del cultivo, y así incrementa la precisión de la predicción y por lo tanto disminuyen las incidencias de plagas y enfermedades para cada etapa fenológica.

III.3.1 Patrones de entrenamiento

En la figura VIII, se puede observar que debido a la relación que existe entre las plagas y enfermedades es necesario tomar en cuenta las condiciones climatológicas ambientales y de suelo, A). Por otra parte, como se mencionó anteriormente, se cuenta con múltiples etapas fenológicas en los cultivos, algunos autores presentan discrepancias entre las etapas del cultivo tomate perita, C). Lo mismo sucede con otro tipo de cultivos, de ahí la razón por la cual en el presente trabajo se consideren solo 5 de las etapas fenológicas de los cultivos observados (tomate y calabaza), B). Lo anterior en base a la descripción de las características analizadas en la sección III.2.2.

Tabla VIII: A) patrón de plagas y enfermedades B) y C) etapas fenológicas.

Patrón de Entrenamiento de la Red Neuronal																							
A	Patrón para Plaga								Patrón para Enfermedades														
	Nombre	C.C.U								Nombre	C.C.U												
		Ambiental				Suelo					Ambiental				Suelo								
		TM	Tm	HRM	HRm	TM	Tm	HRM	HRm		TM	Tm	HRM	HRm	TM	Tm	HRM	HRm					
Patrón para CCO para el Cultivo																							
Nombre	Etapa fenológica	Ambiental				Suelo																	
		TM	Tm	HRM	HRm	TM	Tm	HRM	HRm														
Tomate	Semillero (0-30)									B													
	Transplante (30-35)																						
	Floración (28-35 ddt)																						
	Formación del fruto (55-60 ddt)																						
	Cosecha (85-90 ddt)																						
Incidencias																							
C	E. Fenologica	Ambiental				Suelo																	
		TM	Tm	HRM	HRm	TM	Tm	HRM	HRm														
Semanas	Semillero																						

III.3.2 Caracterización del modelo predictivo

Para llevar a cabo la caracterización del modelo fue necesario comprender el funcionamiento de los parámetros (temperatura y humedad de suelo y ambiente) y los umbrales tanto del cultivo como de las plagas y enfermedades. A continuación se muestra el control y la interpretación de las condiciones climatológicas.

Para llevar a cabo el control de las condiciones climatológicas ambientales y de suelo (CCA y CCS), es necesario considerar lo siguiente:

- Si la **WTAM** es **mayor** que la **BDTAM** entonces **PWTAM**, es considerada una incidencia fuera del umbral.
- De otra forma no se considera fuera del umbral.

Donde:

WTAM, (son los valores de la temperatura ambiental máxima registrada que se reciben de la WSN.

BDTAM, son los valores que se almacenan en la base de datos PPE (Predicción de Plagas y Enfermedades).

El ejemplo anterior se repite para las temperaturas de suelo registradas.

Los siguientes parámetros climatológicos siguientes se excluyen, debido a que no es posible que se presenten simultáneamente:

- TAM, Tam (Temperatura máxima ambiental y mínima simultáneamente).
- HRAM, HRAm (Humedad máxima y mínima ambiental simultáneamente).
- TSM, TSm, (Temperatura Máxima de suelo y mínima simultáneamente).
- HRSM, HRSm (Humedad Máxima de suelo y mínima simultáneamente).

Por lo tanto se presentan solo los siguientes casos, los cuales se encuentran en la figura 11.¹⁴

- Incidencias fuera de umbrales (A)
- Problemas con equipo (B)

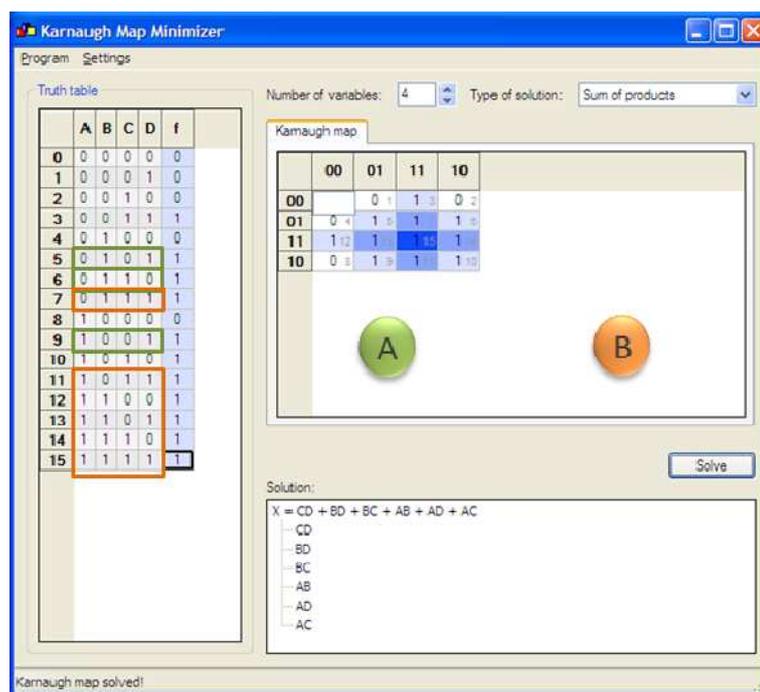


Figura 11: A) Incidencias de alertas. B) Posibles daños en el equipo (sensores).

En la tabla IX, se muestran los grupos 6 y 9, que representan las alteraciones fuera de los umbrales, es decir que no coinciden con las condiciones en las que tentativamente no se pueden desarrollar las plagas o enfermedades, estos son los alertas fuera de umbrales. Así mismo los grupos 5 y 10, representan las condiciones ideales en el cultivo, o al menos las que se mantienen al margen de los umbrales y a su vez representa los problemas con el equipo.

¹⁴ <http://k-map.sourceforge.net/>

Tabla IX: Reconocimiento de los valores en alteraciones y daños al equipo.

- 6 y 9 Representan las alteraciones fuera de los umbrales

5 y 10, podrían representar condiciones no existentes. Sin embargo, en ese rango se encuentran rangos de las condiciones “normales” de los cultivos.

No	TAM	Tam	HRAM	HRAm	f
5	0	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1
9	1	0	0	1	1
10	1	0	1	0	1

III.3.2.1 Descripción de los grupos

En la tabla X se puede observar que: los insectos y los virales, plagas y enfermedades respectivamente, se desarrollaban en condiciones cálidas. A su vez los ácaros y las bacterianas coincidían en su desarrollo durante la presencia de climas frescos. Y finalmente los nematodos y las fungosas, se desarrollan durante periodos de climas moderados, es decir, no se desarrollaban en climas extremos. Bajo las observaciones anteriores, las cuales surgen del análisis de las plagas y enfermedades del tomate perita, se agruparon tanto las plagas y enfermedades con el objetivo de buscar los rangos necesarios para predecir qué enfermedad o plaga se podría presentar en el cultivo.

En la tabla XI, se muestra los valores que se obtuvieron del análisis de la figura 11, y de acuerdo a los grupos antes mencionados resultan los siguientes rangos.

Debido a que los grupos A y D comparten los climas extremos, se unificaron en el grupo de los insectos y virales bajo los rangos de 0.0 a 0.2 para la primera, y 0.9 a 1.0 para la segunda. En el grupo B, se encuentran los ácaros y las bacterianas, con el rango de 0.3 y 0.5. Y finalmente en el grupo C, se encuentran los nematodos y las fungosas, en el rango de 0.6 a 0.8. Estos rangos se requieren para seleccionar las plagas y enfermedades y disminuir la búsqueda de incidencias entre estas y el cultivo. Así pues, una vez que se envían los datos de las condiciones climatológicas a la estación base, se le asigna un rango dependiendo del número de ocasiones en las que se presentó un parámetro fuera de su umbral, por un determinado tiempo. Si estas son consideradas incidencias entonces se registran y se retoman cuando se solicita la predicción. Es de esta forma como se selecciona una lista de posibles plagas y enfermedades del cultivo.

Tabla X: Clasificación de grupos para entrenamiento de la red neuronal.

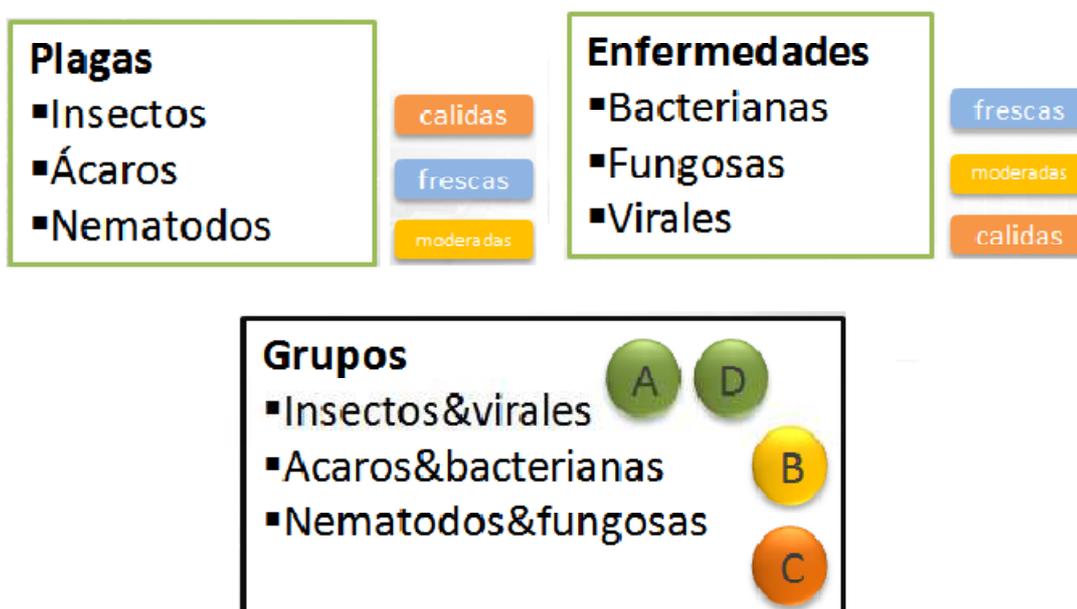


Tabla XI: Relación entre plagas y enfermedades por condiciones climatológicas.

No	TAM	Tam	HRAM	HRAm	f	
5	0	1	0	1	1	A → B → De 0.0 a 0.2
6	0	1	1	0	1	B → De 0.3 a 0.5
9	1	0	0	1	1	C → De 0.6 a 0.8
10	1	0	1	0	1	D → De 0.9 a 1.0

III.3.2.2 Estructura de la red neuronal para el modelo predictivo

Los componentes para la estructura de la red neuronal para el modelo predictivo están dados de la siguiente manera:

Las entradas corresponden a los parámetros de temperaturas y humedades máximas y mínimas que se presentan en el ambiente y en el suelo tanto del invernadero como en el campo abierto.

- Ejemplo: **Entradas: TAM, Tam, HRAM, HRAm.**
- Las salidas son representadas de acuerdo a la figura III.3.2.2
- Ejemplo: **Salidas: 0.0 a 0.2, 0.3, a 0.5, 0.6 a 0.8, 0.9 a 1.0**, siendo estos rangos fijos para el resto de las entradas.
- Tipo de red: **Retro propagación (Backpropagation).**
- Arquitectura: **4, n, 4 (Entradas, capas ocultas, salidas).**

Para fijar el número de capas es necesario realizar entrenamientos, variando el número de capas ocultas. De esta forma se identifica en donde se presenta el menor error cuadrático. En este caso el mejor comportamiento fue de 6 capas ocultas.

La función para la programación del entrenamiento de la red fue la siguiente:

JooneTools.train(neuralNets, entrada, salida, 50000, 0.0005, 2500, System.out, false);¹⁵

- Donde neuralNet, es el nombre de la red.
- La entrada, es el vector de datos (Ejemplo en la figura III.3.2.2).
- La salida son los valores de los rangos mencionados en la figura III.3.2.2.
- El número de ciclos está fijado como 50000.
- El tiempo para generar cada ciclo es 0.0005.
- El tiempo de impresión de cada ciclo es de 2500.
- Y finalmente en donde se desea visualizar los resultados.

En la figura 12, se muestra un ejemplo del comportamiento de los componentes de la red neuronal que se describieron anteriormente.

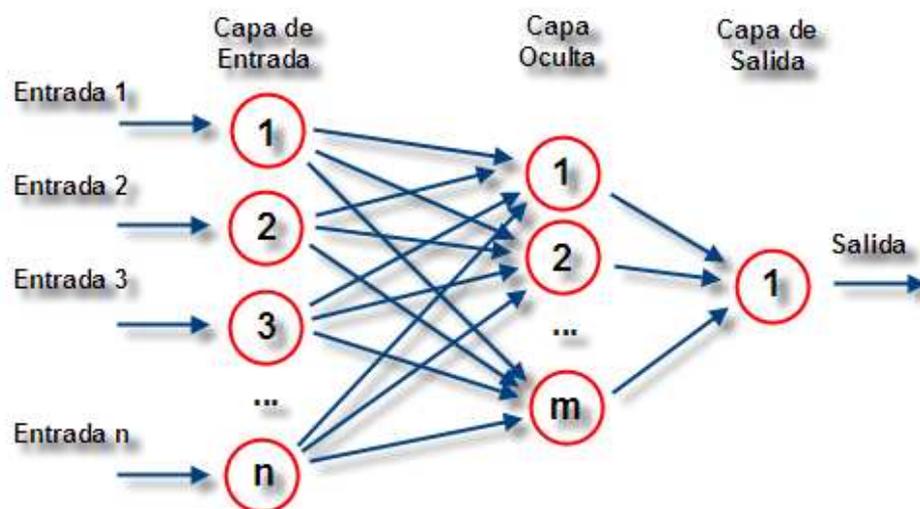


Figura 12: Estructura de la red neuronal.

¹⁵ <http://www.joone.org>

III.3.2.3 Incidencias

Después de agrupar las incidencias de las plagas y enfermedades en base a sus condiciones climatológicas, es necesario conocer la frecuencia de entrada óptima que se requiere para la recolección de datos. Para posteriormente establecer un marco de referencia de tiempo, menor al de una etapa fenológica, para obtener una predicción más cercana al comportamiento real del cultivo. Es decir establecer un margen de predicción dentro de una etapa fenológica y contar con datos suficientes para la predicción. Para lo anterior se llevaron a cabo los siguientes pasos.

- Los datos se envían cada **30** minutos.
- Existen **48** posibles incidencias en el transcurso del día.
- Por observaciones en el campo, si estas incidencias son mayores a **16** durante el día, representan una incidencia de día y se toman la lista de plagas y enfermedades.
- Incidencias a 7 días (6-8 días), representan una mejor predicción.
- Si las incidencias de los parámetros climatológicos se presentan por más de tres días, aun cuando no son consecutivos. Se debe de alertar al usuario.

III.4 Comportamiento del modelo predictivo

En la figura 13, se muestra el comportamiento del modelo predictivo desde que los datos ingresan al nodo base de la WSN, hasta que son almacenados y procesados en las dos DBMS.

En el inciso A), se muestra el invernadero en el que se encuentra la WSN, las líneas azul y roja representan los parámetros de temperatura y humedad de ambiente y suelo, respectivamente. B), estos parámetros llegan al nodo base del equipo Eko, y son enviados al Gateway C), donde son procesados por la DBMS Eko.

Posteriormente, y a través de la aplicación E), se extraen los datos y son procesados para comparar los umbrales que ya se tienen en el DBMS PPE D).

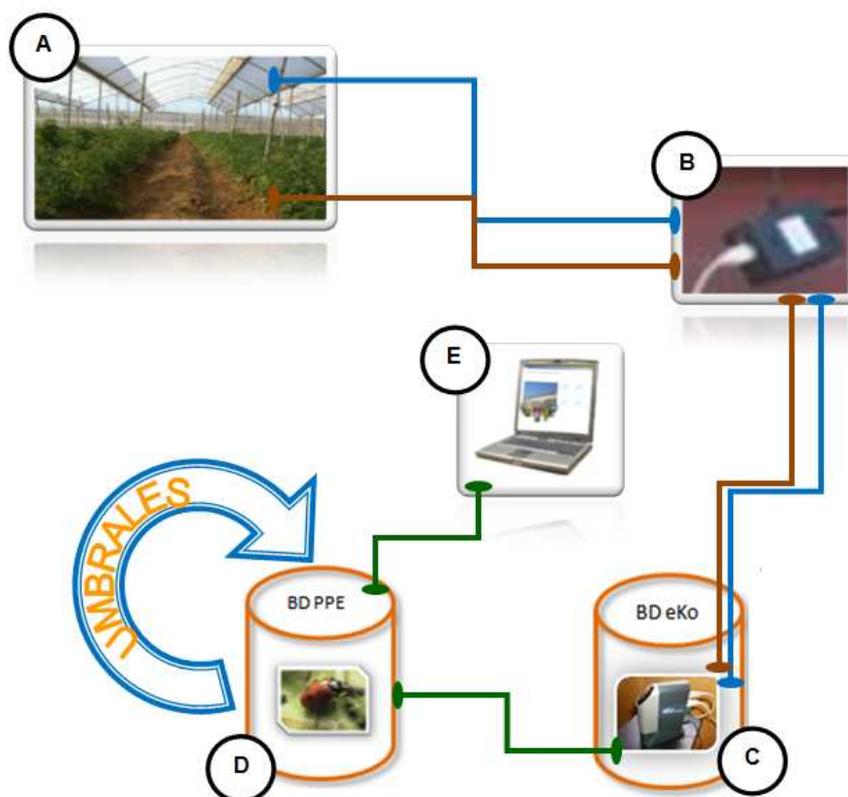


Figura 13: Comportamiento del modelo predictivo. A) WSN. B) Nodo base C) DBMS Eko. D) Comparación entre umbrales del cultivo, plagas y enfermedades. E) Modelo de predicción.

III.5.- Conclusión

Es muy complejo utilizar todos los parámetros en los que se ve rodeado un cultivo. En este capítulo se mostraron los parámetros utilizados para el modelo predictivo, los cuales fueron las condiciones climatológicas y las etapas fenológicas. Se mencionó que en las condiciones climatológicas óptimas para el desarrollo del cultivo (tomate perita), coincidía en muchas ocasiones con las condiciones que propician el desarrollo de plagas y enfermedades. Presentándose esta situación tanto en invernadero como en campo abierto. A su vez se mostró la agrupación de las plagas y enfermedades por medio de las condiciones climatológicas para su desarrollo, las cuales compartían, y de esta forma se le asignaron rangos a estos grupos para así aumentar la precisión en la predicción.

Con lo anterior, se propone un modelo básico para la predicción de plagas y enfermedades en cultivos, en el cual es posible que se agreguen más parámetros. De esta manera solo será necesario estudiar la técnica (algoritmos o redes neuronales) para realizar un análisis de estos parámetros y así incrementar la precisión del modelo predictivo.

Finalmente, hasta el momento no hay predicción exacta, por lo mismo es difícil encontrar un modelo predictivo que reúna todas las características que se requieren para la predicción de plagas y enfermedades en los cultivos. Sin embargo, se puede contar con un modelo predictivo, en el que para realizar predicciones se tome en cuenta de mayor a menor importancia los principales parámetros (o factores) que propicien el desarrollo de las plagas y enfermedades.

Capítulo IV

Sistema para la predicción de plagas y enfermedades

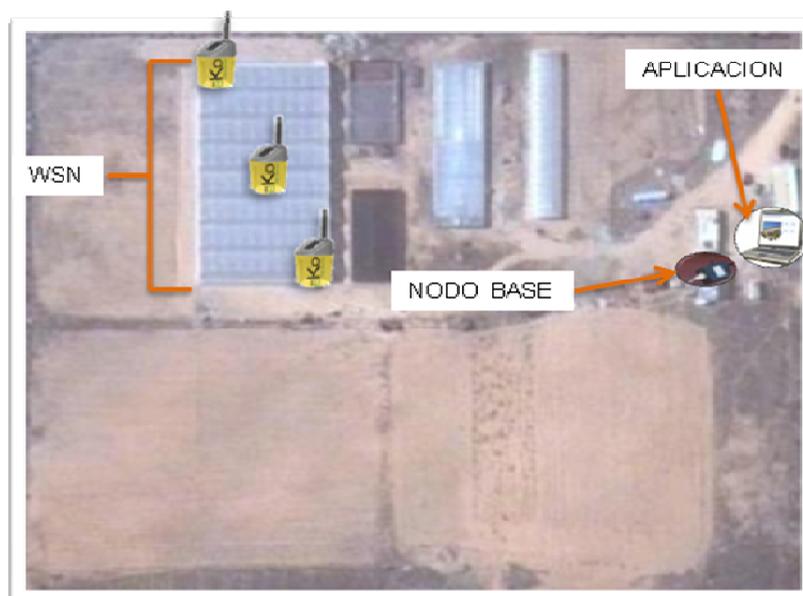
IV.1 Área de estudio

La parte práctica de éste proyecto se realizó en las instalaciones de Acuicultura del Desierto, ubicada a 4 kilómetros del poblado de San Antonio de las Minas en el municipio de Ensenada, Baja California, México. En éste lugar se encuentran varios invernaderos, en los cuales se cultivan principalmente: tomate, tarragón, calabaza, entre otros. La actividad principal que se realiza en este lugar se desarrolla en el invernadero tipo Ámbar 960, en donde se instalaron estratégicamente 3 nodos del equipo Eko Pro Series. Los cuales cuentan con sensores que proporcionan información de temperatura y humedad tanto de suelo como de ambiente.

El objetivo del estudio fue monitorear el comportamiento de dos cultivos (uno en invernadero y el otro a campo abierto), para posteriormente utilizar el modelo predictivo para ambos ambientes y analizar su comportamiento, con la finalidad de obtener información útil para analizar las diferentes plagas y enfermedades que han afectado y pueden presentarse en los cultivos. Y finalmente se realizaron pruebas para analizar el comportamiento del modelo de predicción.

IV.2 Red inalámbrica de sensores en el invernadero tipo Ámbar 960

La ubicación del equipo eko, específicamente la de los nodos (con los sensores), se llevó a cabo de acuerdo a la información de Cárdenas Tamayo (2008), quien realizó pruebas para conocer la calidad de la señal desde el invernadero Ámbar 960, hasta el nodo base. En la figura 14 se muestra la localización de los tres nodos, y la ubicación de la estación base.



Pro Series

Para cada nodo que se encuentra instalado en la WASN, se tienen de 3 a 4 sensores (temperatura y humedad) tanto ambiental como de suelo. Los datos recolectados por la red viajan de forma inalámbrica al nodo base, y posteriormente son enviados al Gateway Eko.

La aplicación que se desarrolló se enlaza por medio de una conexión segura tipo SSH al DBMS Eko, para obtener los datos que son enviados por los sensores cada media hora. Enseguida el sistema realiza el proceso de comparación de cada uno de los umbrales, por medio de las técnicas de retropropagación y de los datos almacenados en ambos DBMS (Eko y PPE). Los resultados muestran la alerta de una posible plaga o enfermedad,

dependiendo de las incidencias de los umbrales.

IV.3 Arquitectura del sistema para el modelo predictivo

La arquitectura consta de dos componentes principales (Ver figura 15), el modelo de predicción y la WSN. En el modelo de predicción podemos encontrar los componentes de: control predictivo, manejador DBMS PPE, y el manejador DBMS Eko.

En el componente de control predictivo se encuentran los registros del cultivo, la predicción, que corresponde a la comparación de umbrales y un controlador, que es el encargado de ingresar a las DBMS. En el DBMS PPE se almacenan los umbrales de las condiciones en que se desarrollan las plagas y enfermedades. El DBMS PPE se conecta al DBMS Eko para obtener los datos obtenidos por los sensores.

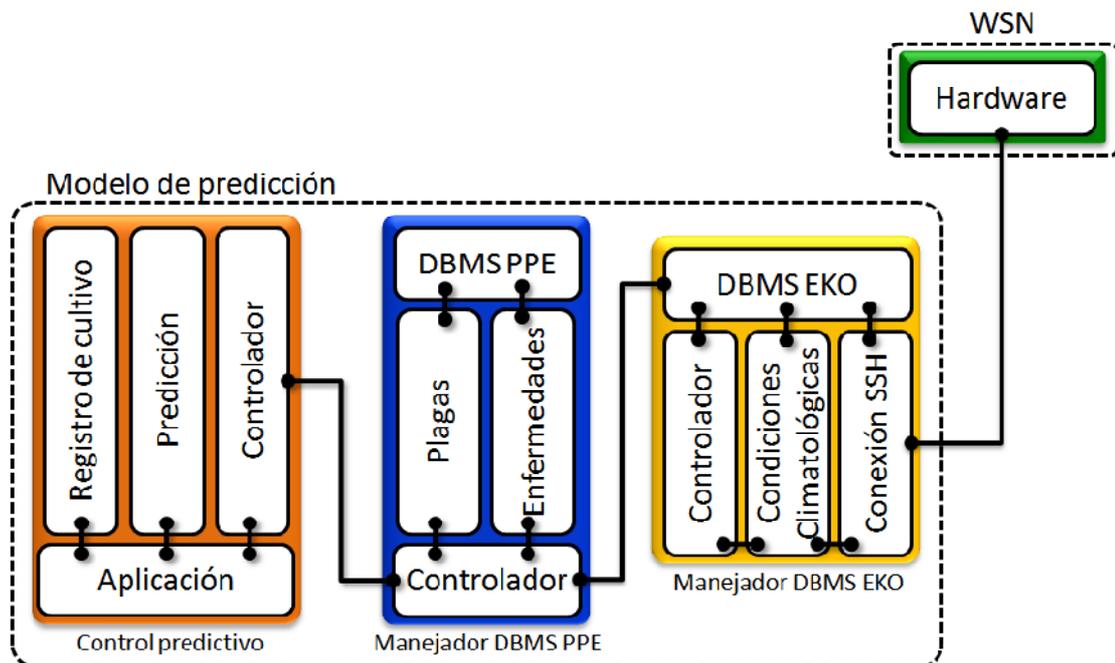


Figura 15: Componentes de la arquitectura para el modelo predictivo.

IV.3.1.1 Componente Control predictivo

En este componente se encuentra el registro del cultivo, predicción y controlador. Este último se refiere a la conexión con los otros componentes. A continuación se muestra la descripción de estos.

- *Registro de cultivo.* Es el encargado de obtener la información correspondiente al cultivo, así como los parámetros relacionados a él, como lo son; etapas fenológicas y umbrales para las condiciones climatológicas.
- *Predicción.* Es el responsable de comparar cada uno de los umbrales tanto del cultivo como de las plagas y enfermedades que le corresponden. De esta manera verifica las incidencias en los umbrales y realiza una estimación por día y por semana, para dar a conocer una lista de las posibles plagas y enfermedades que se pueden desarrollar bajo esas condiciones.
- *Controlador.* Los controladores son los responsables de conectar las bases de datos PPE y Eko con el componente de control predictivo.

IV.3.1.2 Componente Manejador DBMS PPE

Este componente es el responsable de administrar la información relacionada a las plagas y enfermedades.

- *Plagas y enfermedades.* Son los responsables de almacenar la información correspondiente a estas, y al cultivo, así como los umbrales en los que se desarrollan.
- *DBMS PPE.* se encarga de almacenar los componentes anteriores, además de almacenar la información del subcomponente de condiciones climatológicas del componente DBMS Eko.

IV.3.1.3 Componente Manejador DBMS Eko

Este componente se encarga de realizar tanto la conexión al equipo Eko, así como el almacenamiento de los registros que resulten de éste. Así mismo es responsable de mantener la comunicación con los otros componentes.

- *DBMS Eko*. Es el encargado de almacenar la información relacionada a los sensores que se encuentran en el componente WSN. Este subcomponente es parte de la arquitectura del equipo Eko Pro Series.
- *Condiciones climatológicas*. Es el componente que obtiene solo los parámetros requeridos por el componente Manejador DBMS PPE. Almacena temperaturas y humedades de ambiente y suelo, y datos del tiempo de sensado (fecha y hora).
- *Conexión SSH*. Es el responsable de realizar la conexión entre el componente Manejador DBMS PPE y el DBMS Eko. Se encarga principalmente de la apertura y cierre de la conexión así como de las funciones de la extracción de los parámetros.

IV.3.1.4 Componente WSN

Para ilustrar la arquitectura del sistema y su funcionamiento, en la figura 16 se muestra un escenario, en el cual se puede observar el siguiente comportamiento: A) Los nodos dentro del invernadero se encargan de recolectar los parámetros (humedad, temperatura de ambiente y suelo, entre otros), y son enviados al nodo base, B). Posteriormente son almacenados por el DBMS Eko C). Una vez que el DBMS PPE, solicita estos datos, inicia el proceso de comparación de umbrales entre el cultivo, plagas, enfermedades y etapas fenológicas, D). Para finalmente, por medio del modelo predictivo mostrar una lista de posibles plagas y enfermedades que se desarrollan en base a las condiciones climatológicas actuales o por semana que se presentan E).

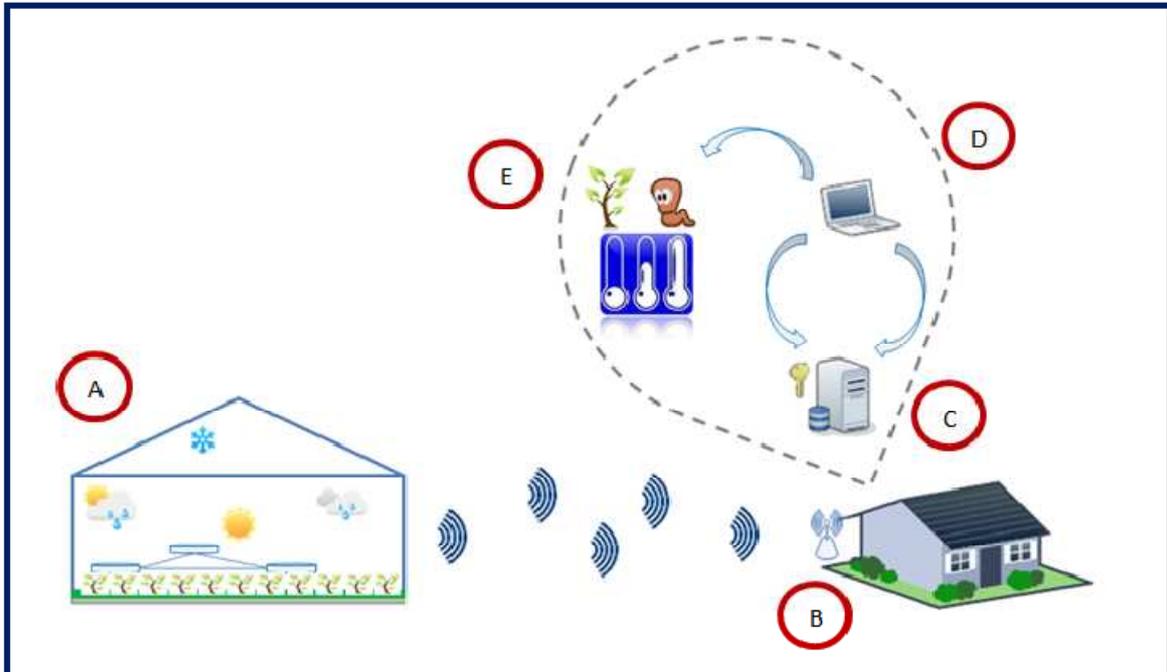


Figura 16: Escenario de la arquitectura.

IV.4 Diseño del sistema predictivo

Para realizar el diseño del sistema se utilizaron los diagramas de secuencia de UML (Unified Modeling Language, por sus siglas en ingles)¹⁶, como lo son los casos de usos y diagramas de secuencia para cada una de las actividades que se realizan en la arquitectura propuesta. Los casos de uso describen las interacciones de un sistema con los usuarios. Cada caso de uso proporciona uno o más escenarios que indican cómo interactúa el sistema con el usuario o con otro sistema para conseguir un objetivo específico. Un mismo actor puede llevar a cabo varias tareas, estas dan como resultado un valor para el actor o para un tercero.

El objetivo principal para el diseño de la aplicación, es mostrar el funcionamiento del modelo predictivo por medio de una herramienta de software. De esta manera es posible observar los resultados obtenidos por dos tipos de cultivos y por la comparación de un cultivo con datos históricos, para así comprobar la confiabilidad de este modelo.

A continuación se muestran los casos de usos de la arquitectura propuesta (Ver figura 17).

Caso de uso: *Solicitar lecturas*. Esta tarea pertenece al equipo eko, el objetivo es la recolección de datos.

Descripción: El caso de uso inicia cuando el componente de control solicita las lecturas (datos) al DBMS PPE. Este a su vez envía los datos de solicitud al DBMS Eko, el cual identifica y autoriza la solicitud, enviando como respuesta las lecturas. Finalmente el DBMS PPE almacena y procesa los datos.

¹⁶ <http://www.uml.org/>

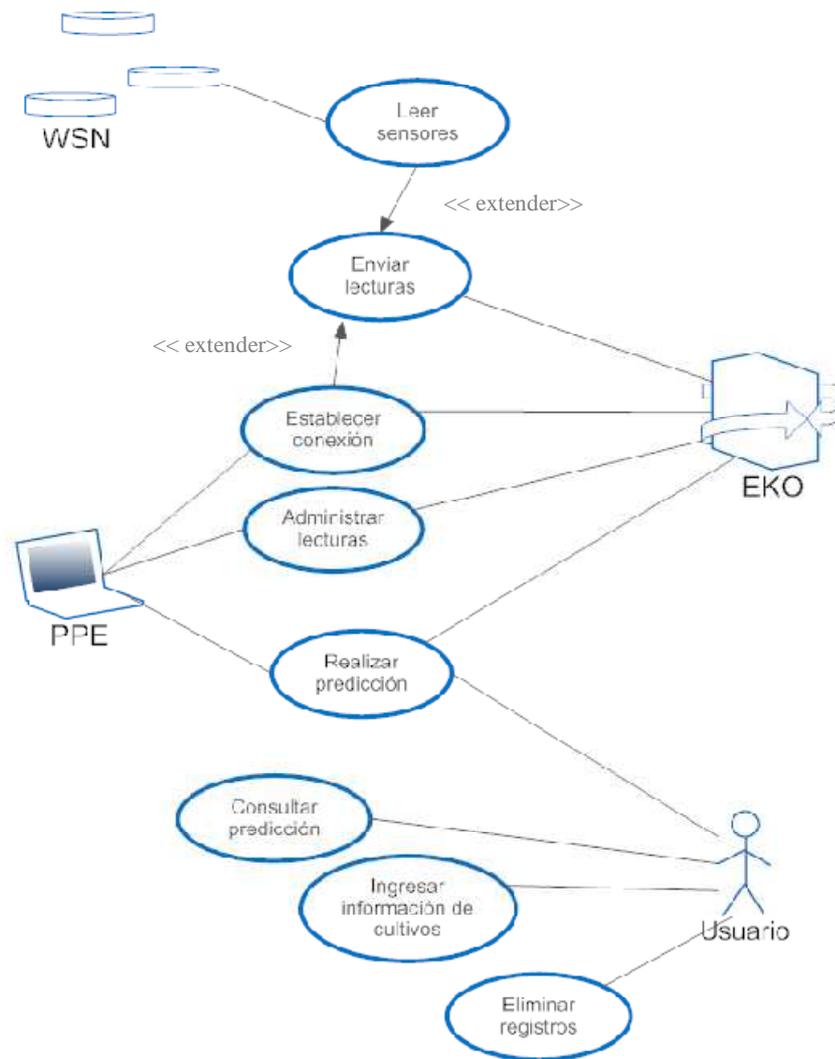


Figura 17: Diagrama de casos de uso de la arquitectura propuesta.

Caso de uso: *Establecer conexión:* el objetivo es establecer por medio del plug in SSHfactory, se puedan obtener los datos que se almacenaran en el DBMS Eko y el DBMS PPE.

Descripción: El caso de uso inicia cuando el componente de control requiere que se establezca la conexión para iniciar el proceso de solicitud de datos. El DBMS PPE solicita la conexión al DBMS Eko. Una vez que se han solicitado los datos de acceso por parte del DBMS Eko, el DBMS PPE envía los datos de acceso y después del control de autorización por parte del DBMS Eko, el DBMS PPE, obtiene su autorización de conexión segura.

Caso de uso: *Realizar predicción.* Tiene como objetivo comparar los umbrales de las plagas y enfermedades por parte del DBMS PPE y enviar las incidencias (predicción) al usuario

Descripción: El caso de uso inicia cuando el usuario requiere realizar una predicción. El componente de control solicita la predicción al DBMS PPE, el cual verifica los datos almacenados y solicita las últimas lecturas registradas al DBMS Eko. El cual los envía e inicia por parte del DBMS PPE, el proceso de comparación de umbrales de cultivo, plagas y enfermedades. Para finalizar con un análisis de los resultados y enviar las incidencias al usuario.

Caso de uso: *Consultar predicción.* El objetivo es que el usuario al solicitar una consulta de las predicciones actuales para conocer el comportamiento del cultivo.

Descripción: El caso de uso inicia cuando el usuario solicita consultar la consulta de la predicción. El componente de control ingresa los datos del cultivo solicitado, al DBMS PPE, este verifica los datos y envía las incidencias registradas al componente de control. Para posteriormente ser enviadas al usuario por este último.

Caso de uso: *Ingresar información de cultivos.* El usuario ingresa la información relacionada al cultivo y los parámetros correspondientes al mismo.

Descripción: El caso de uso inicia cuando el usuario ingresa la información que se requiere para la predicción (el nombre del cultivo los parámetros climatológicos correspondientes a cada una de las etapas fenológicas, así como también las relacionadas a las plagas y enfermedades). Posteriormente el componente de control ingresa los datos al DBMS PPE para darles formato y almacenarlos.

Caso de uso: *Eliminar registros.* El objetivo es eliminar registros.

Descripción: Este caso de uso inicia cuando el usuario desea realizar eliminar registros. El componente de control solicita la eliminación de registros al DBMS PPE, el cual verifica los datos y elimina los umbrales existentes.

IV.5 Diagramas de secuencia

El diagrama de secuencia se utiliza en UML para agregar una dimensión del tiempo a las interacciones de los objetos. Es decir, se realiza un diagrama donde los objetos se colocan en la parte superior y el tiempo avanza de arriba hacia abajo. Un diagrama de secuencia muestra los objetos que intervienen en un escenario con líneas discontinuas verticales, y los mensajes pasados entre los objetos como flechas horizontales. Los mensajes pueden ser asíncronos o síncronos, los primeros corresponden a las llamadas a los métodos del objeto que recibe el mensaje, los segundos terminan inmediatamente y crean un nuevo hilo de ejecución dentro de la secuencia. Los mensajes se dibujan cronológicamente, desde la parte superior a la inferior, teniendo una distribución horizontal de los objetos la cual es arbitraria. (Schmuller, 2001).

En la figura 18 se muestra la conexión entre el DBMS PPE y el DBMS Eko, en este caso de uso se excluyen las actividades dentro del DBMS Eko, ya que son consideradas parte del funcionamiento del equipo Eko Pro Series, mostrándose ocultas para el usuario.

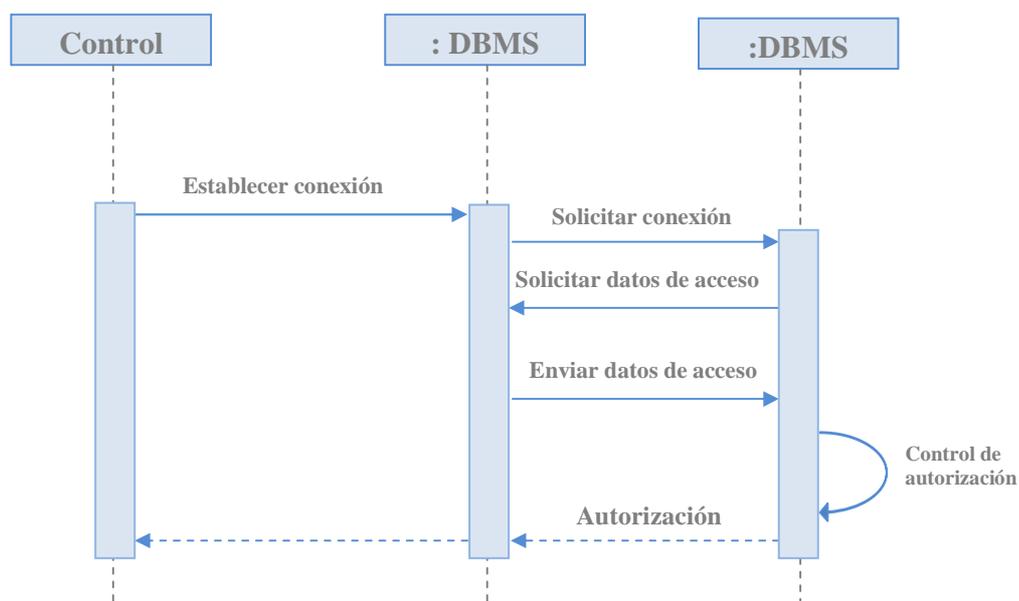


Figura 18: Diagrama de secuencia del caso de uso Establecer conexión.

En la figura 19, se muestra el diagrama de secuencia del caso de uso ingresar información. Por medio de la cual se registran los datos necesarios que posteriormente se utilizaran para la predicción de plagas y enfermedades.

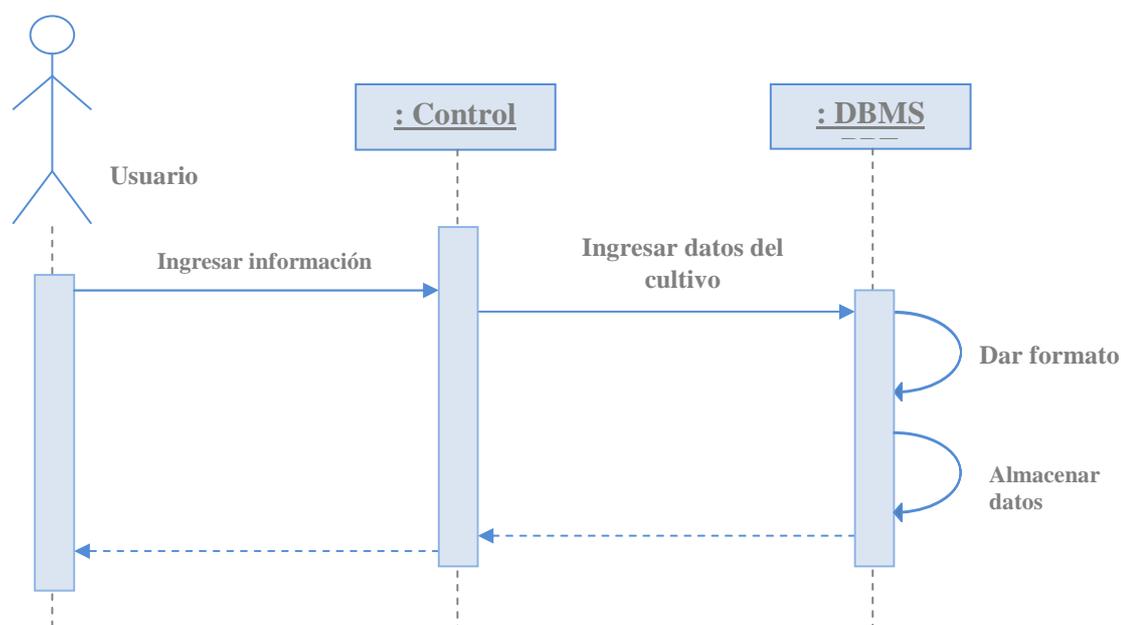


Figura 19: Diagrama de secuencia del caso de uso Ingresar información.

En la figura 20, se encuentra el diagrama de secuencia del caso de uso solicitar lecturas. En donde se obtienen las lecturas registradas y almacenadas en el DBMS Eko.

La figura 23, se muestra el diagrama de secuencia del caso de uso realizar predicción. La cual se lleva a cabo por medio del usuario e intervienen ambos DBMS. Y finalmente las figuras 21 y 22 se muestran los diagramas de secuencia de los casos de uso consultar predicción, y eliminar registros.

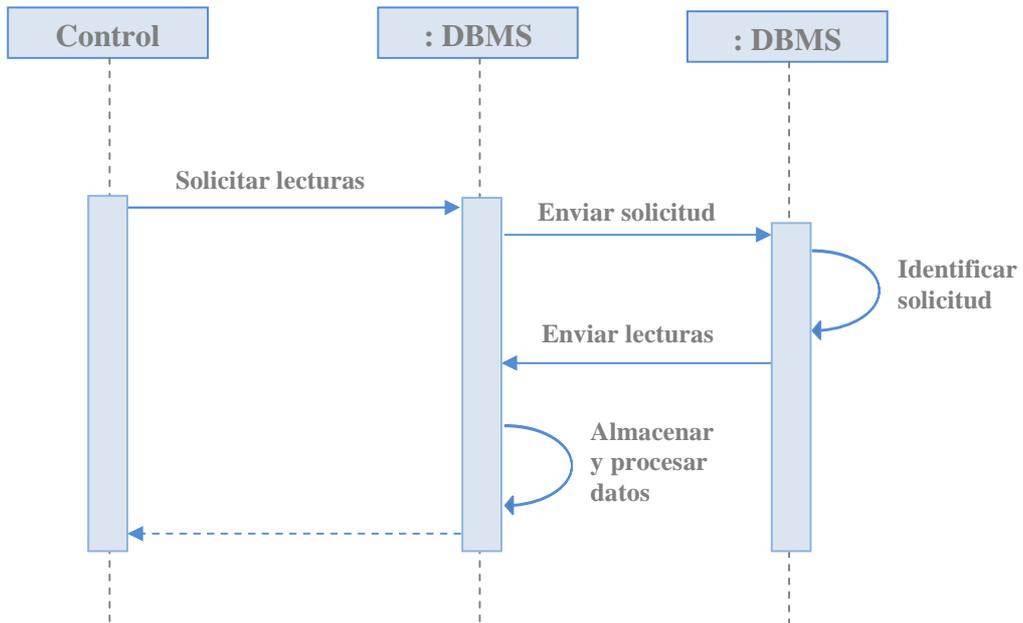


Figura 20: Diagrama de secuencia del caso de uso Solicitar lecturas.

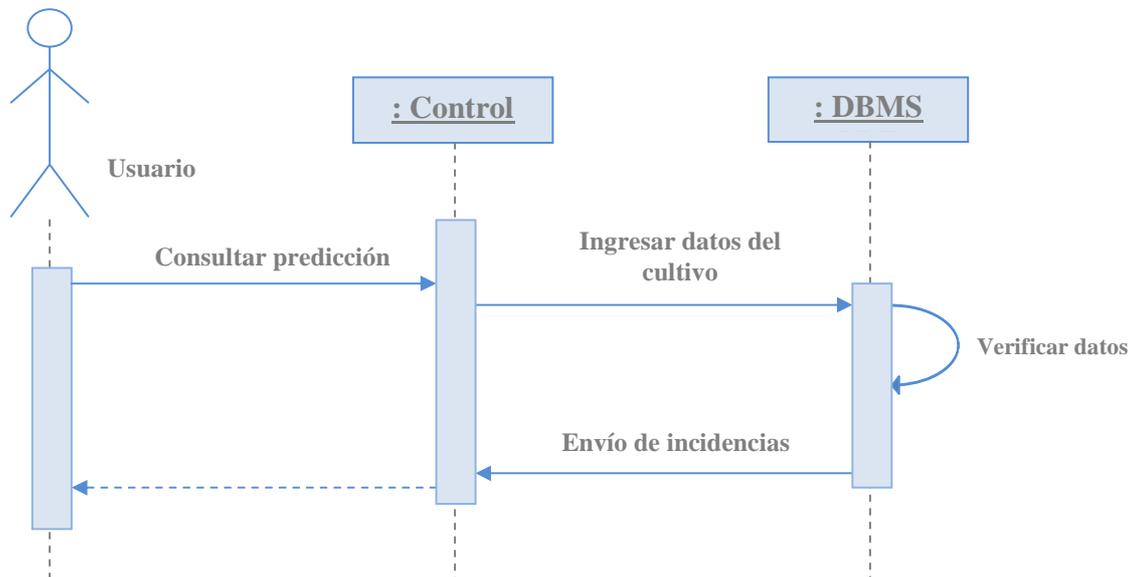


Figura 21: Diagrama de secuencia del caso de uso Consultar predicción.

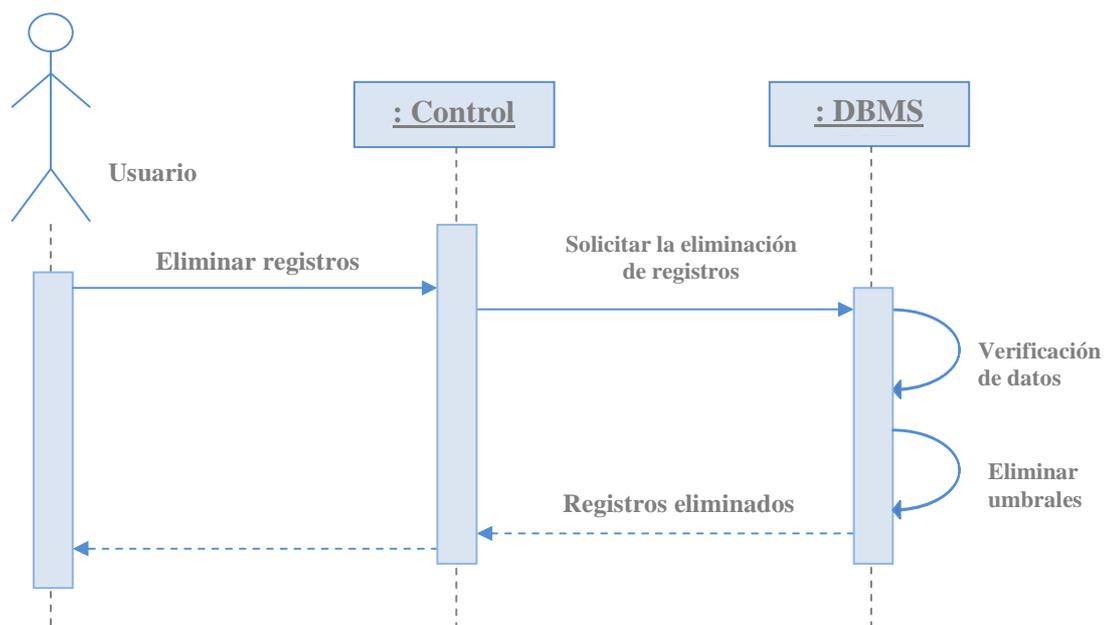


Figura 22: Diagrama de secuencia para el caso de uso Eliminar registros.

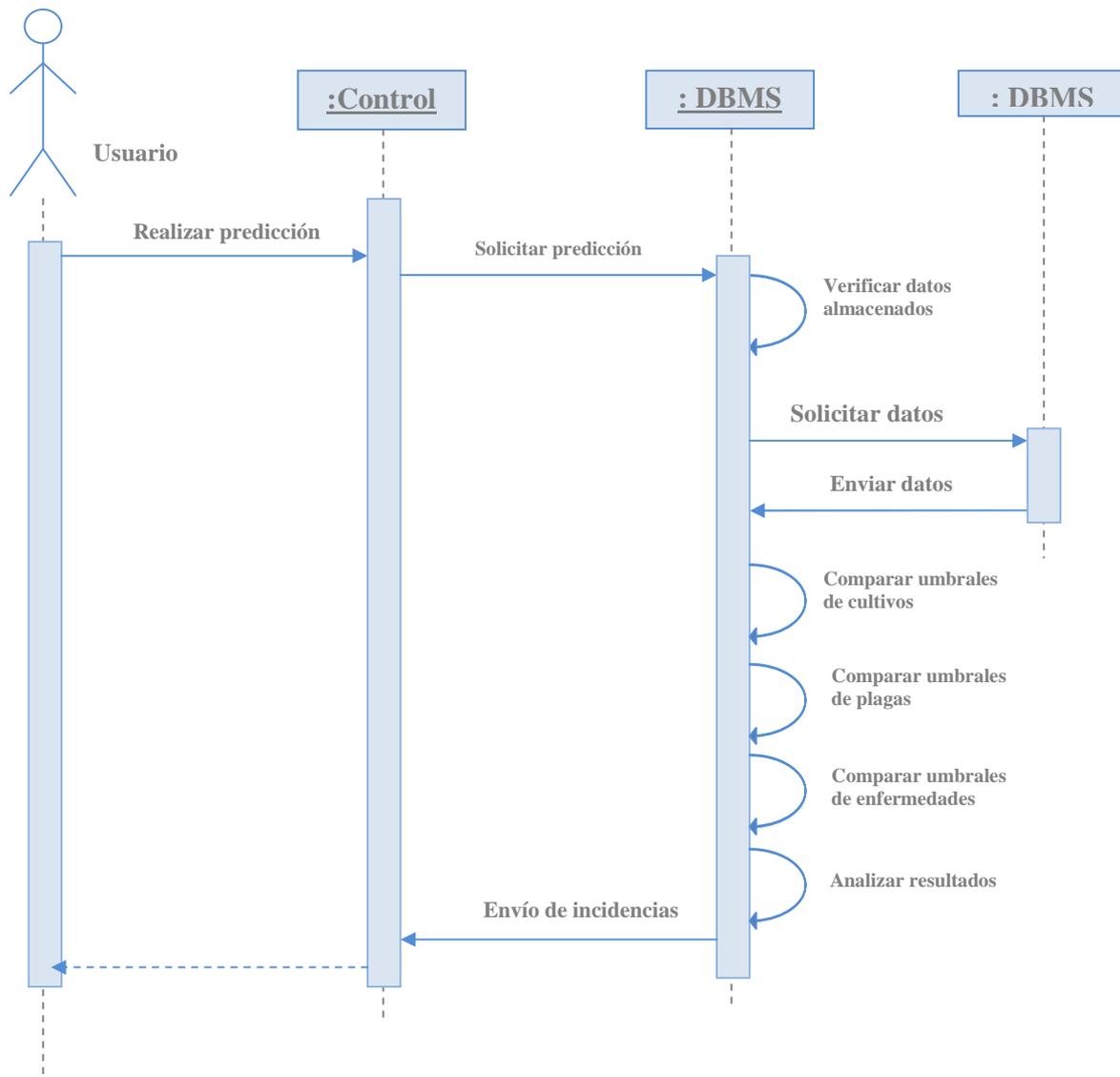


Figura 23: Diagrama de secuencia para el caso de uso Realizar predicción.

IV.6 Diseño de la aplicación

En la figura 24, se muestra la grafica del comportamiento general del modelo predictivo, desde que se ingresan los datos hasta que son procesados. Así mismo se observan los diferentes parámetros: predicción, condiciones climatológicas actuales (entrantes de la WSN), incidencias (comparación de datos con los registrados en las dos bases de datos), la información del cultivo y de las plagas y enfermedades relacionadas a este, actividades (almacenar, predecir y recopilar datos) y recursos (WSN, bases de datos Eko y PPE: predicción de plagas y enfermedades).

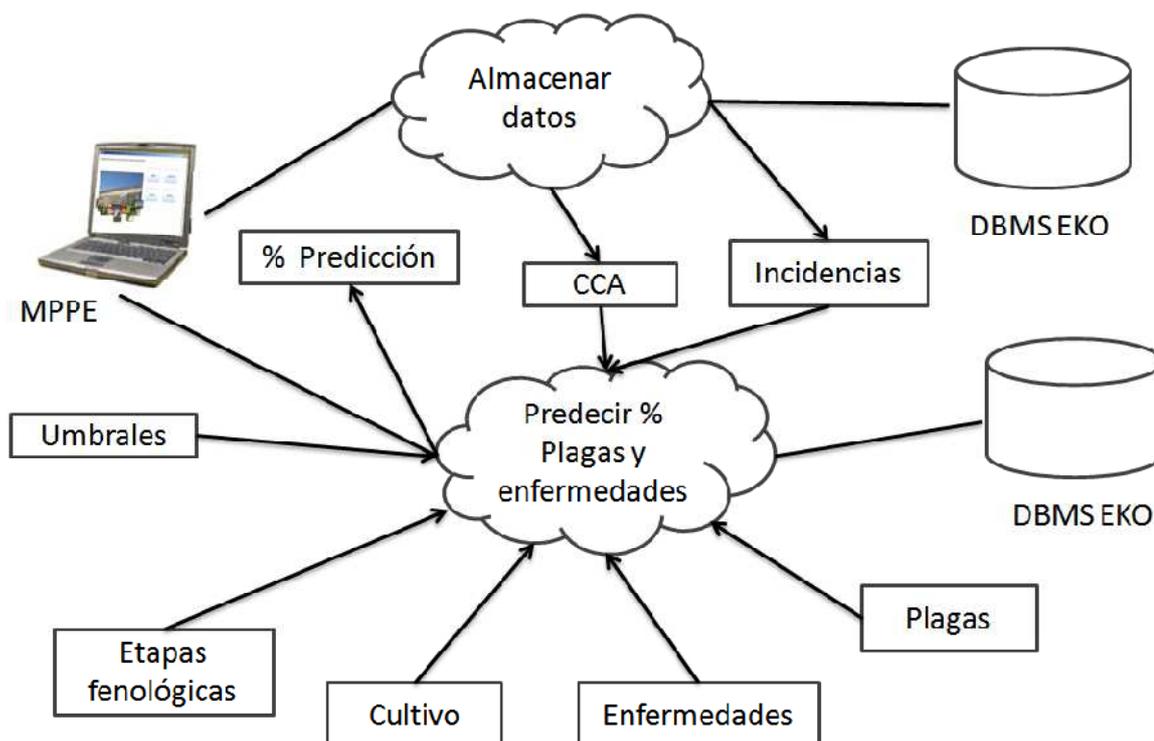


Figura 24: Grafica del comportamiento del modelo predictivo

A continuación se muestran las capturas de pantalla de la aplicación.

En la figura 25, se muestran los requerimientos de información que se deben ingresar por parte del usuario, para llevar a cabo la predicción de las plagas y enfermedades del cultivo. El usuario puede agregar modificar o eliminar la información correspondiente a las plagas. Es necesario que ingrese todos los campos, principalmente aquellos relacionados a las condiciones climatológicas de cada etapa fenológica. Debido a que de esta forma asegura una mejor predicción. Aun cuando la herramienta de software es una respuesta al modelo, se integraron las funcionalidades básicas, tales como: agregar, modificar y eliminar cultivos, como se muestra a continuación.

Modelo Predictivo

PREDECION CULTIVO CONEXION ESTADISTICAS

Cultivos Plagas Enfermedades

AGREGAR / MODIFICAR / ELIMINAR -- CULTIVOS

Agregar Modificar Eliminar

Nombre del cultivo: Tomate perita

CONDICIONES CLIMATOLOGICAS

Ambiente				Suelo				E. Fen.
TA Max	TA Min	HR Max	HR Min	TA Max	TA Min	HR Max	HR Min	
35	15	60	35					1
								2
								3
								4
								5

Agregar

Figura 25: Captura de pantalla de cultivo

Para la solicitud de información tanto de plagas como de enfermedades la mecánica es similar a la de cultivo. En la figura 26, se muestran otras opciones tales como: descripción y daño, esto se debe a la constante preocupación que muestra el usuario por conocer estos datos y así tener una mayor confianza al conocer las condiciones en que se desarrollan las plagas y enfermedades en su cultivo. Sin embargo tanto la descripción, daño, tipo, y familia de la plaga o enfermedades no son necesarias para la predicción.

La figura 27, se encuentra la captura de pantalla de los datos que se requieren ingresar para las enfermedades del cultivo. Y finalmente en la figura 28, se encuentran los resultados de la predicción del tomate perita, en un periodo de una semana.

AGREGAR / MODIFICAR / ELIMINAR -- PLAGAS

Agregar Modificar Eliminar

Nombre: Mosca blanca

Tipo: Insectos

Familia: Insectos

Descripción: Son de cuatro alas horizontales y alrededor de 1.5 mm de largo.

Daño: Las plantas infectadas presentan menos vigor y las hojas se cubren con mielecilla.

CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

Ambiente				Suelo				E. Fen.
TA Max	TA Min	HR Max	HR Min	TA Max	TA Min	HR Max	HR Min	
26.5	12.7	80	75					1
								2
								3
								4
								5

Agregar

Figura 26: Captura de pantalla de plagas.

Modelo Predictivo

PREDICCIÓN CULTIVO CONEXION ESTADISTICAS

Cultivos Plagas Enfermedades

AGREGAR / MODIFICAR / ELIMINAR -- ENFERMEDADES

Agregar Modificar Eliminar

Nombre: Mancha bacteriana

Sintomas: Amarillamiento general de la hoja

Familia: Bacteriana

Descripción: Enfermedad causada por Xanthomona campestris pv. vesicatoria con síntomas similares a los de la mancha negra

Daño: Se propaga por semilla contaminada durante el proceso de extracción de la misma. La entrada de la bacteria en la planta se produce a través de abertura

CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

Ambiente				Suelo				E. Fen.
TA Max	TA Min	HR Max	HR Min	TA Max	TA Min	HR Max	HR Min	
32	24	100	90					1
								2
								3
								4
								5

Agregar

Figura 27: Captura de pantalla de enfermedades.

Modelo Predictivo

PREDICCIÓN CULTIVO CONEXION ESTADISTICAS

Lista de plagas

1	Alifos/Pulgones	
2	Mosca blanca	
3	Trips	
4	Minador de hoja	

Lista de enfermedades

1	Fusarium	
2		
3		
4		

Predecir

Figura 28: Captura de pantalla de predicción.

IV.7 Conclusión

En este capítulo se presentó la ubicación del equipo Eko, la arquitectura del modelo predictivo, la descripción de los componentes que la conforman y de forma grafica en los diagramas de secuencia se mostraron las diferentes tareas desempeñadas por los equipos y por el usuario, durante el proceso de obtención de los datos climáticos de la WSN y la predicción de las plagas y enfermedades. Y finalmente, se describe el diseño de la aplicación en el que se muestran los requerimientos necesarios para la predicción.

Capítulo V

Evaluación del modelo predictivo

En este capítulo se presenta la evaluación del modelo de predicción PPE. Misma que se llevó a cabo por medio de una evaluación funcional. La finalidad de esta evaluación es conocer los alcances del modelo para obtener una predicción significativa, tomando en cuenta los parámetros utilizados. Para lo cual se compararon los resultados del modelo, con los obtenidos en el campo durante tres cosechas.

V.1 Evaluación del modelo predictivo PPE

Para llevar a cabo la evaluación se tomaron muestras de dos tipos de cultivos, calabaza y tomate perita. Los parámetros recolectados del cultivo de calabaza y tomate perita, son recolectados de un invernadero (Ámbar 960). Así mismo se tomó un conjunto de datos que corresponden a una cosecha de tomate perita (campo abierto), con un tiempo de diferencia entre los cultivos mencionados anteriormente, de dos años aproximadamente. Este último se consideró, con el fin de observar los resultados del modelo; es decir, conocer la lista de posibles plagas y enfermedades que se presentaron y compararlas con las que se reportaron en su momento.

V.1.2 Variables

Como variable independiente se definió el cultivo, ya que es necesario comprobar con diferentes cultivos el modelo predictivo.

Como variables dependientes se tienen las condiciones climatológicas de cada cultivo y las correspondientes a las plagas y enfermedades, así como las etapas fenológicas.

V.1.3 Procedimiento

Para el desarrollo de este modelo se instaló el equipo (Eko Pro Series) para la recolección de datos (Temperatura y humedad de suelo y ambiente). Después se observó el comportamiento del cultivo durante un periodo aproximado de seis meses (Septiembre 2007-Enero 2008, Febrero-Agosto 2008, Febrero-Agosto 2009). Durante ese periodo se realizaron ajustes al sistema de riego basándose en la observación del comportamiento del cultivo. La fase final consistió en probar el modelo para los dos cultivos (Tabla XII).

Nombre del cultivo	Siembra a campo abierto	Siembra en invernadero
Cultivo tomate	✓	✓
perita		
Calabaza		✓

Tabla XII: Toma de muestras

Con los cultivos de tomate en invernadero y calabaza en invernadero, se obtuvieron los resultados del funcionamiento del modelo predictivo. Así mismo con la información de los parámetros obtenidos del cultivo tomate (Cárdenas Tamayo, 2008), se evaluó el modelo de predicción.

En la tabla XIII, se observan los parámetros relacionados a las enfermedades de los cultivos calabaza y tomate perita. Así mismo en la tabla XIV, se encuentran las predicciones para las plagas para ambos cultivos.

Tabla XIII: Muestra de parámetros de enfermedades.

Tipo	Plagas	Condiciones climatológicas				Cultivos	
		Temp (min/max)		Hum(min/max)		Tomate	Calabaza
Insectos	Afifos/Pulgones	29	27	80	60	X	X
	Mosca blanca	12.7	26.5	75	80	X	X
	Trips	18	20		50	X	
	Orugas	25	35			X	X
	Minador de hoja	10	25	40	60	X	
Ácaros	Ácaro blanco	10	35			X	
	Araña roja	22	25	40	55	X	X
Nema- todos	Nematodo de raíz	15	20	90	100	X	X

Tabla XIV: Muestra de parámetros de plagas.

Tipo	Enfermedades	Temp (min/max)		Hum (min/max)		Tomate	Calabaza
Bacteriana	Cancer bacteriano	24	32	90	100	X	
	Mancha bacteriana	24	29	80	100	X	
	Mancha negra del tomate	20	25			X	
	Marchitez bacteriana	26	32	80	100	X	
Fungosas	Cenicilla	18	26	52	75	X	X
	Fusarium	21	33	83	90	X	
	Mancha de la hoja	20	27	85	100	X	
	Moho gris	18	23	85	100	X	
	Moho blanco	20	25	85	90	X	
	Midium	10	25	75	90		
	Oidium	20	30	70	80	X	X
	Tizon Temprano	28	30	95	100	X	
Tizon tardio	17	21	91	100	X		

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos, al comparar la lista de plagas y enfermedades que se obtuvo del modelo predictivo y las que se presentaron en el cultivo. En este comportamiento se observó para dos cultivos en invernadero (tomate perita y calabaza). Así mismo se ingresó la información proporcionada por Cárdenas Tamayo (2008), con el fin de comprobar el funcionamiento del modelo y probarlo con datos históricos.

Así pues en la tabla XV se encuentran las plagas del tomate perita en invernadero. En donde se observa que en promedio se puede predecir 3 plagas de cuatro que se presentan. Así mismo en la tabla XVI de enfermedades para el mismo cultivo en invernadero, se obtuvo un promedio de 3 enfermedades de 3 que se presentaron, cabe mencionar que se presentó un error con diferencia de 1 en las primeras etapas fenológicas del cultivo.

La tabla XVII, muestra las plagas en invernadero del cultivo calabaza. En esta ocasión se observó la predicción de 2 aciertos en relación a las 3 plagas presentadas en promedio. Sin embargo se presentó una diferencia de 2 errores en la predicción de plagas, con respecto a las reales, observándose esto en las primeras etapas fenológicas del cultivo. De igual forma en la tabla XVIII, de enfermedades del mismo cultivo en invernadero, se observaron un total de 2 aciertos en relación a las 2 enfermedades presentadas, esto en promedio.

Cabe mencionar que esta predicción fue la más exacta, lo cual se debe a que se cambió de cultivo en relación a la temporada anterior, lo cual genera cambios en los organismos que sobreviven al cultivo anterior. Así mismo y por las observaciones presentadas, este cultivo presentó menor influencia de plagas y enfermedades, sin embargo la siembra tardía del mismo mermó en un alto porcentaje la cosecha.

Finalmente, se muestran las evaluaciones al modelo con datos históricos. El objetivo como se menciona anteriormente, fue conocer el comportamiento del modelo en otro cultivo y en campo abierto. En la tabla XIX se muestran las plagas y enfermedades que presenta el cultivo tomate perita, en donde en promedio se obtuvieron 2 aciertos de 2 plagas presentadas.

Sin embargo persiste la influencia de las primeras etapas fenológicas en las que se encuentra un mayor número de plagas próximas y nulas, lo cual sugiere que, aun cuando el modelo predictivo acierta a las plagas presentadas en las primeras etapas, la lista que muestra de plagas próximas y nulas agregan "ruido" al momento de prevenir una u otra plaga.

Por lo tanto en las primeras etapas el modelo carece de veracidad en sus predicciones. Y en la tabla XX, se muestran las enfermedades a campo abierto del mismo cultivo. Se puede observar un comportamiento similar al de las plagas de la tabla anterior, sin embargo el "ruido" de plagas próximas, se muestra en las etapas intermedias, generalmente entre la etapa 2,3, y 4.

Tabla XV: Plagas en invernadero. Cultivo tomate perita.

Cultivo: tomate perita, relación de plagas en invernadero.				
	Acertadas	Próximas	Nulas	Reales
Día	4	0	2	5
Semana	3	4	1	3
1 mes	3	4	0	3
2 meses	4	3	0	4
3 meses	4	4	2	4
4 meses	4	6	3	4
5 meses	4	4	2	4
6 meses	4	5	3	5
1 año	4	6	4	5
Total	34	36	17	37
Media	3.7	4	1.8	4.1
Desv. Estandar	0.44	1.8	1.36	0.78

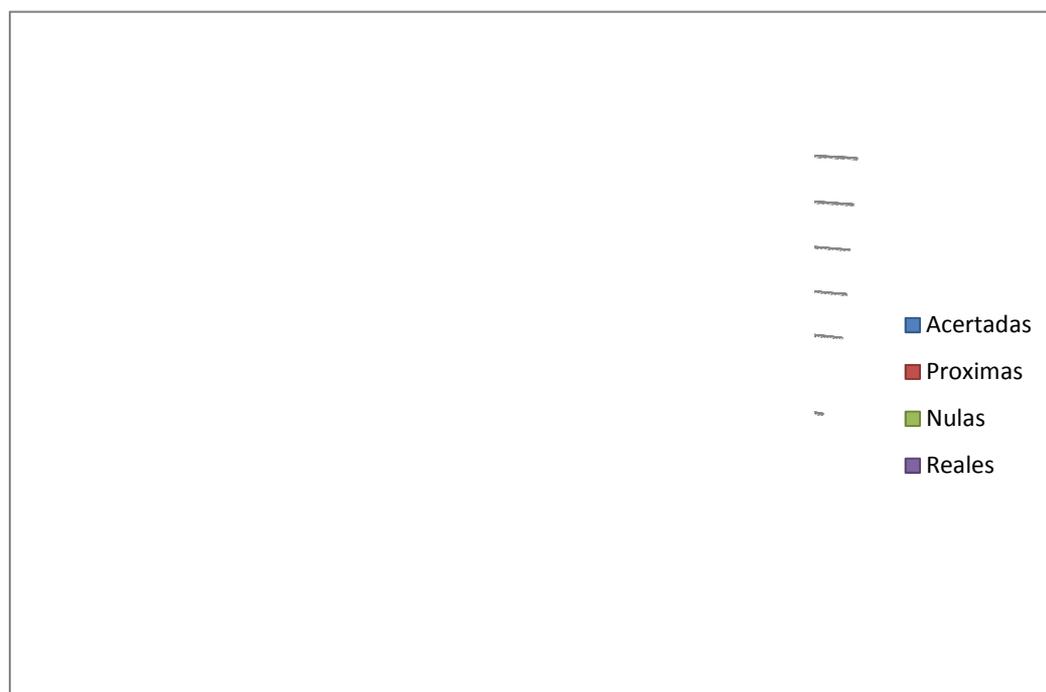


Figura 29: Plagas del tomate en invernadero.

Tabla XVI: Enfermedades en invernadero. Cultivo tomate perita.

Cultivo: tomate perita, relación de enfermedades en invernadero.				
	Acertadas	Próximas	Nulas	Reales
Día	2	3	3	3
Semana	3	3	2	3
1 mes	4	5	4	4
2 meses	4	6	3	4
3 meses	4	7	4	4
4 meses	3	5	4	4
5 meses	3	5	4	3
6 meses	4	6	3	4
1 año	4	5	3	4
Total	31	45	30	33
Media	3.4	5	3.3	3.6
Desv. Estandar	0.72	1.32	0.70	0.5

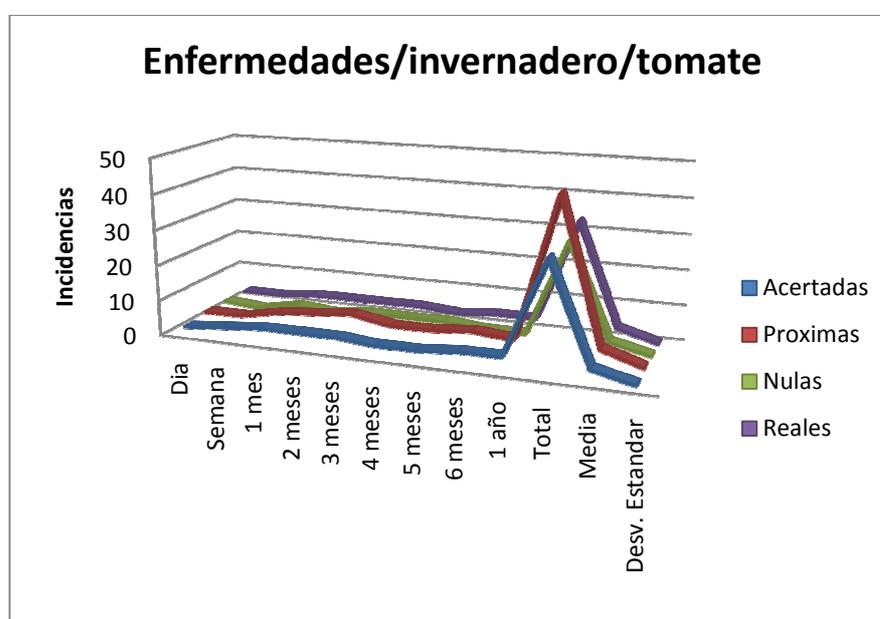


Figura 30: Enfermedades del tomate en invernadero.

A continuación se muestran los resultados del cultivo de calabaza en invernadero.

Tabla XVII: Plagas en invernadero. Cultivo calabaza.

Cultivo: calabaza, relación de plagas en invernadero.				
	Acertadas	Próximas	Nulas	Reales
Día	2	4	0	4
Semana	3	4	0	3
1 mes	3	3	0	3
2 meses	4	3	0	3
3 meses	4	3	0	3
4 meses	3	2	1	3
5 meses	3	2	0	3
6 meses	2	2	0	3
1 año	2	3	1	2
Total	26	26	2	27
Media	2.8	2.8	0.2	3
Desv. Estandar	0.78	0.78	0.44	0.5

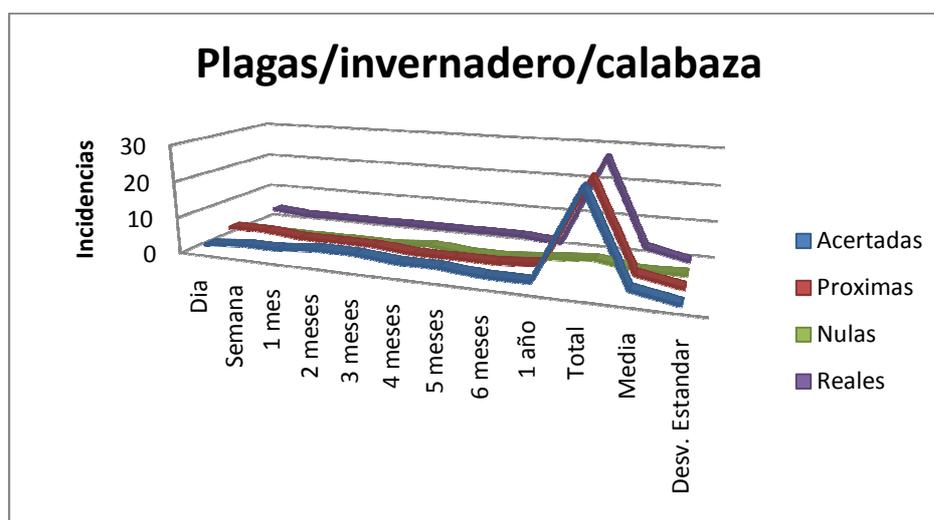


Figura 31: Plagas de calabaza en invernadero.

Tabla XVIII: Enfermedades en invernadero. Cultivo calabaza.

Cultivo: calabaza, relación de enfermedades en invernadero.				
	Acertadas	Próximas	Nulas	Reales
Día	1	2	1	1
Semana	2	1	0	2
1 mes	2	1	0	2
2 meses	3	0	0	3
3 meses	3	0	0	3
4 meses	3	0	0	3
5 meses	2	1	0	3
6 meses	1	1	1	1
1 año	1	1	1	1
Total	18	7	3	19
Media	2	0.7	0.3	2.1
Desv. Estandar	0.86	0.6	0.5	0.92

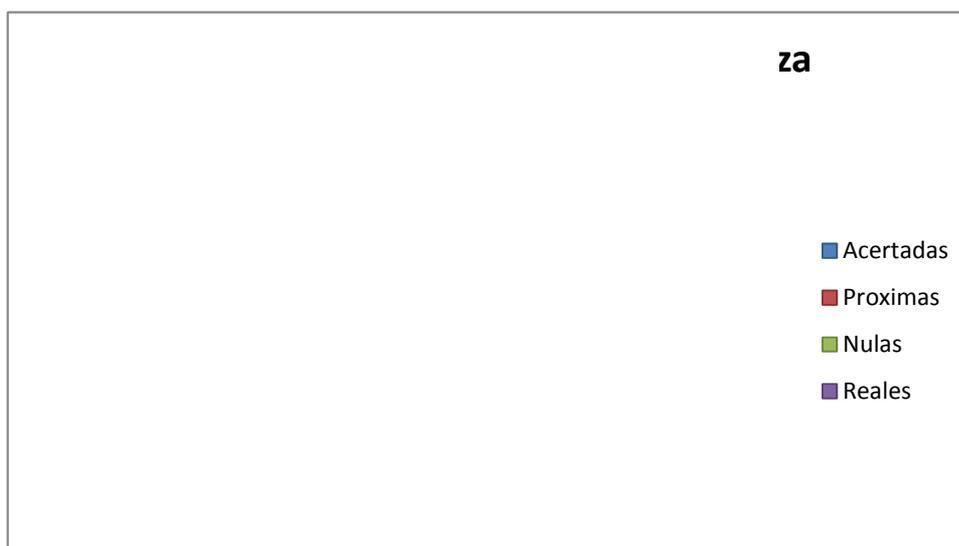


Figura 32: Enfermedades de calabaza en invernadero.

A continuación se muestran los resultados del cultivo tomate a campo abierto.

Tabla XIX: Plagas a campo abierto. Cultivo tomate perita.

Cultivo: tomate perita, relación de plagas a campo abierto.				
	Acertadas	Próximas	Nulas	Reales
Día	1	4	4	2
Semana	2	3	1	2
1 mes	2	3	2	2
2 meses	3	5	2	3
3 meses	3	5	3	3
4 meses	3	6	4	3
5 meses	2	5	3	2
6 meses	2	5	3	2
1 año	3	4	5	3
Total	21	40	27	22
Media	2.3	4.4	3	2.4
Desv. Estandar	0.70	1.01	1.22	0.52

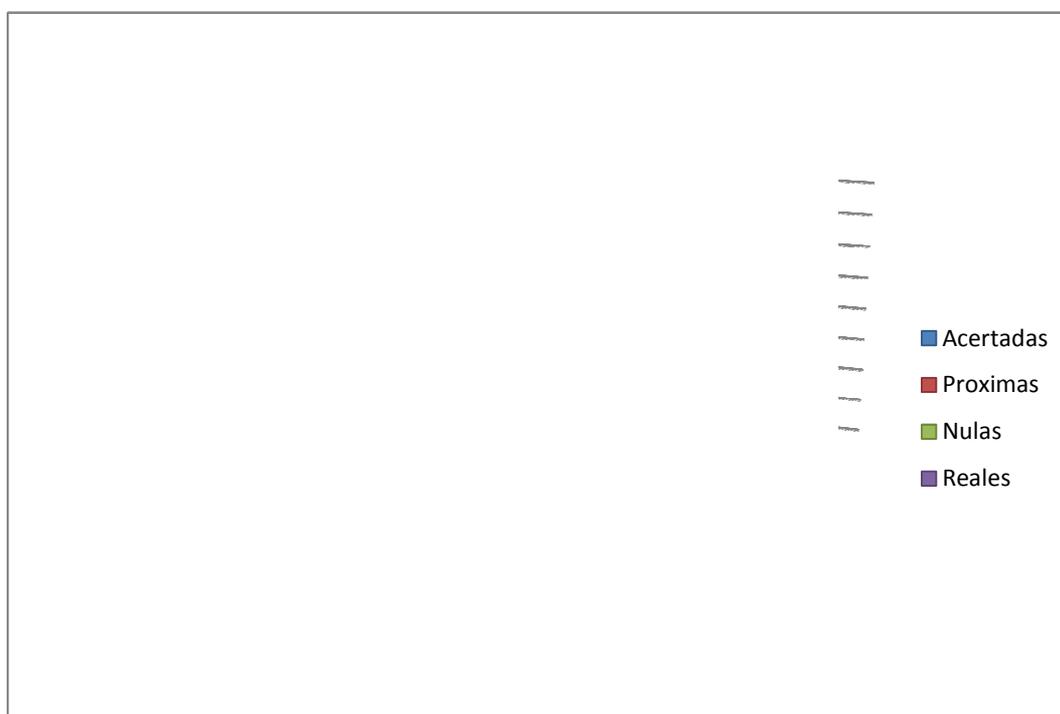


Figura 33: Plagas de tomate a campo abierto.

Tabla XX: Enfermedades a campo abierto. Cultivo tomate perita.

Cultivo: tomate perita, relación de enfermedades a campo abierto.				
	Acertadas	Próximas	Nulas	Reales
Día	2	2	4	3
Semana	3	5	2	3
1 mes	2	4	5	2
2 meses	2	6	4	2
3 meses	2	4	5	2
4 meses	3	6	5	3
5 meses	3	5	4	3
6 meses	2	5	5	2
1 año	2	4	5	2
Total	21	41	39	22
Media	2.3	4.5	4.3	2.4
Desv. Estandar	0.5	1.2	1	0.5

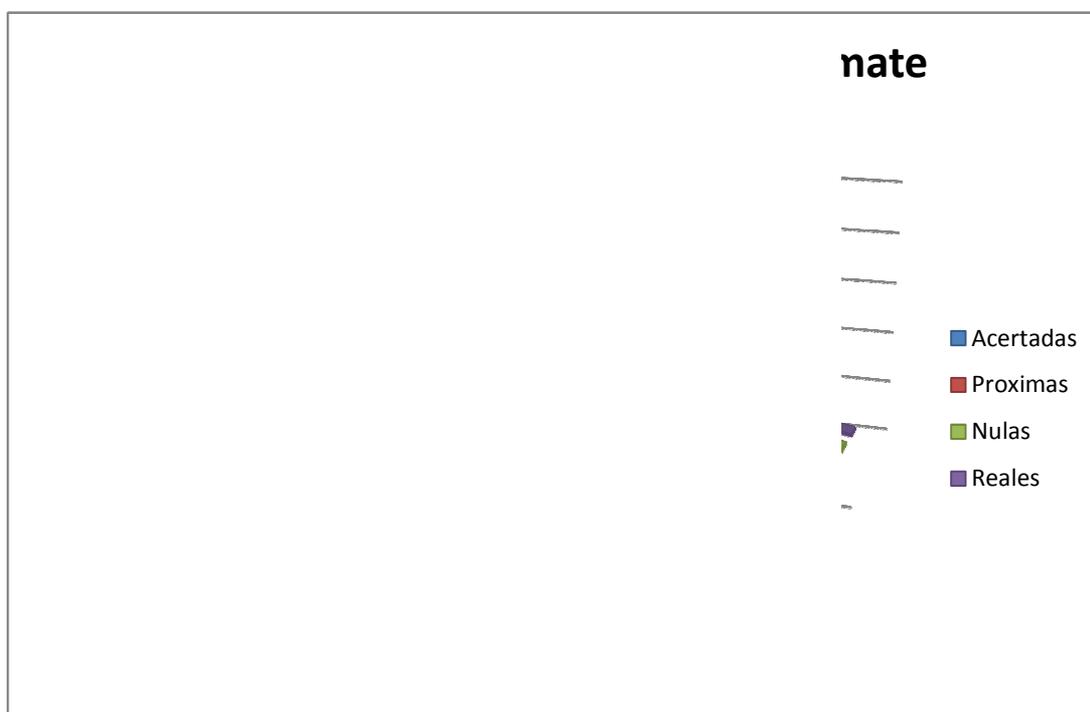


Figura 34: Enfermedades de tomate a campo abierto.

V.2 Análisis de resultados

V.2.1 Análisis de la evaluación del modelo predictivo

Con el objetivo de obtener mayor validez se llevó a cabo la evaluación del modelo predictivo en tres fases, las cuales se rigen por los dos cultivos (calabaza y tomate) en invernadero y en campo abierto). Para observar el comportamiento de los datos se confirman los siguientes enunciados.

El modelo predictivo permite predecir plagas y enfermedades en sus primeras etapas de desarrollo.

Los resultados mostrados sobre ambos cultivos, presentan una respuesta favorable al modelo. Es decir, mientras es posible obtener una lista de plagas para el cultivo en invernadero, con un número significativo de aciertos, aún cuando las condiciones de control son limitantes, se demuestra que el modelo puede predecir plagas bajo las condiciones mostradas en el capítulo V. Lo mismo sucede para las plagas del cultivo dentro del invernadero.

Los resultados obtenidos de las plagas del cultivo a campo abierto, mostraron que es posible predecir, en el caso del tomate perita, con un error que oscila entre 1 y 3 las plagas que se presentan. (Rodríguez F., 2007).

El modelo predictivo representa la base de la predicción en cultivos.

Los resultados obtenidos del primer enunciado demuestran que aún cuando se tiene un menor número de parámetros para predecir una cantidad considerable de plagas y enfermedades tanto en campo abierto como en cultivos protegidos, y debido a las

incidencias de los parámetros presentados por distintas referencias en el capítulo III, el modelo se puede considerar la base de un modelo de predicción. (Linker., y Seginer, 2003).

El modelo predictivo soporta diferentes cultivos.

En los resultados obtenidos de plagas y enfermedades en la sección anterior, se observa que en ambos estudios son significativamente altos para apoyar dos o más cultivos, siempre y cuando se cuente con la información completa de cada uno de los parámetros requeridos por el modelo. (Ameur, 2001)

V.3 Conclusiones

En este capítulo se mostraron los resultados de los dos cultivos que se observaron en invernadero (tomate perita y calabaza). Para los cuales el modelo predictivo presentó resultados favorables, a excepción del comportamiento de este es las primeras etapas fenológicas, resultado de cosechas tardías principalmente. De igual forma se muestran los resultados obtenidos para el cultivo de tomate perita a campo abierto en el que se observó que el modelo a pesar de presentar aciertos en las predicciones, también mostraba una lista de plagas y enfermedades cercanas, pero que no se desarrollaban en ese momento. Lo anterior se presentó en las etapas fenológicas 2,3 y 4. A lo largo del análisis se observó la influencia de las plagas y enfermedades en ambos cultivos, de tal forma que la predicción para los cultivos en invernaderos fue más precisa que aquellas de campo abierto. Esto se debe a la influencia de ambientes cambiantes en este último.

Capítulo VI

Conclusiones

Las aplicaciones de modelos predictivos en el sector agrícola han incrementado en los últimos años, y esto se debe a las necesidades que existen en este sector. Sin duda alguna la introducción de nuevas tecnologías se ha dificultado por razones como el apoyo del gobierno de nuestro país, la carencia de conocimiento de los beneficios, costos, y hasta el temor de los agricultores de adquirir equipos que pudiesen quedar obsoletos o almacenados. (Ahmed A. et al., 1995; Ameer S. et al., 2001; Cano R., 2005).

En el sector agrícola se han realizado avances significativos en la introducción de tecnologías como las WSN, sin embargo este nicho de oportunidad es muy amplio y los beneficios no solo se reflejan en el campo y los productos que de él emergen, sino también en la materia prima utilizada con otros fines, como lo es el ejemplo del biodiesel (FAO, 2008).

En el presente trabajo se abordó el tema de tecnologías en el campo y principalmente los métodos y técnicas que se utilizan para resolver problemas de predicción de plagas y enfermedades en el campo. Con el fin de proporcionar un modelo base y una herramienta como respuesta a éste. En base al resultado de las investigaciones, las tecnologías aplicadas en el sector, la disminución de los costos de la tecnología, entre otros factores que impiden el crecimiento de estas áreas, es posible lograr que una de las principales herramientas tecnológicas de este sector, pueda consolidarse en el sector agrícola y en otros sectores que se encuentran sin explorar.

VI.1 Aportaciones

Una de las principales aportaciones para la presente investigación es la propuesta de un modelo base que ofrece una predicción significativa para las plagas y enfermedades de los cultivos ya sea a campo abierto o en invernadero.

Por otra parte se encuentra la exploración de las diferentes técnicas y métodos para elaborar un modelo predictivo o bien desarrollar herramientas de software basadas en estas. Mismas que ofrecen mejores resultados, dependiendo del tipo de parámetro que se desee utilizar. De esta forma se evita utilizar métodos o algoritmos que carezcan de crecimiento al intentar desarrollar modelos de predicción más robustos.

Como resultado de esta investigación se proporciona una herramienta de software para observar el comportamiento de los cultivos tanto a campo abierto como en invernadero. Para posteriormente visualizar las posibles plagas y enfermedades que se pueden presentar, y de esta forma prevenirlas al detectarlas en las primeras etapas de su desarrollo.

VI.2 Limitaciones

Las observaciones que se desprenden de la investigación en el presente trabajo, se presentaron en circunstancias difíciles, debido al campo de estudio. Realizar un análisis bajo condiciones controladas o de laboratorio resulta más cómodo, principalmente porque se puede llevar a cabo un diseño de experimentos sobre el cual es posible determinar con la confiabilidad de los resultados. Para este estudio, se presentaron las siguientes limitaciones:

VI.2.1 Limitaciones en el campo

El campo de estudio (invernadero 960 y campo abierto), carecía de elementos básicos como son, sistema de riego (para la primera parte del estudio) y ventilación (en el caso del

invernadero). Aunado a esto se observó y se colaboró en la instalación del sistema de riego. El cual requería la observación constante, debido a que la inclinación del terreno favorecía los excesos de recursos (agua y fertilizantes), de esta forma se buscaron estrategias de riego y evitar este tipo de situaciones.

Por otra parte la duración de los cultivos requiere de un tiempo mínimo de seis meses para su observación y recopilación de datos. Por ello resulta complejo realizar experimentos para diferentes cultivos.

VI2.2 Limitaciones para el estudio de variables

Durante el transcurso de la presente investigación, se observó la ausencia de algunos factores relacionados a la obtención de datos, mismos que contribuían a una mayor confiabilidad en los resultados del modelo predictivo. A continuación se detallan algunos de estos factores.

La diversidad de información que existen entre las fuentes (revistas, organizaciones, o autores) que ofrecen repositorios de las características de las plagas y enfermedades en los cultivos, carecen de parámetros uniformes para cada una de ellas. Como resultado se amplía el margen de error de cualquier investigación que utilice estos datos.

Hasta el momento no se cuenta con un marco de referencia en el que se puedan realizar comparaciones por un determinado tiempo para llevar a cabo una toma de decisión. Es decir, en la presente investigación se decidió tomar un margen de 7 días aproximadamente, para recopilar los datos de los umbrales, realizar una predicción de plagas y enfermedades y así ofrecer una predicción más precisa. Esta medida se tomó, como se comenta en el capítulo IV, debido a las observaciones de la duración de las primeras etapas fenológicas de los diferentes cultivos.

VI.3 Trabajo futuro

La presente investigación, representa un trabajo amplio para su continuación, debido a que se muestran varias áreas de trabajo como se muestran a continuación:

VI.3.1 Tecnológico

- En la parte tecnológica se busca expandir las capacidades de la herramienta de software, agregando un *plug in* para agregar nuevos parámetros y elegir las técnicas y métodos a utilizar. De esta manera el modelo podrá ofrecer mayores beneficios tanto para el usuario final como para los estudios de laboratorio.
- Realizar una evaluación de la herramienta y observar el impacto de la tecnología entre los agricultores de diferentes empresas.

VI.3.2 Estudio de campo

- Evaluar el modelo en diferentes ambientes, es decir, realizar comparaciones de las evaluaciones en diferentes ubicaciones y con diferentes cultivos. Para observar su comportamiento y verificar su veracidad.

VI.3.3 Análisis de cultivos

- Realizar un estudio profundo de las incidencias de los parámetros aquí presentados y compararlos con los de diferentes repositorios. Comprobar las afirmaciones mostradas en el capítulo IV, del comportamiento de las condiciones climatológicas en plagas y enfermedades.

VI.3.4 Métricas

- Establecer métricas para la evaluación de los parámetros en relación a los umbrales y a su comportamiento durante las diferentes etapas fenológicas.

VI.4 Conclusiones

La aplicación de tecnologías en el sector Agrícola, el estudio de los factores fitopatológicos de las plantas, las métricas y las evaluaciones de estas, representan un nicho de oportunidad amplio de investigación, debido al análisis de los parámetros que cada una de ellas involucra. Es por esta razón existen modelos de predicción “hechos a la medida” y resulta complejo buscar una predicción de plagas y enfermedades tomando en cuenta las características anteriores. Sin embargo una base sencilla como el modelo presentado en esta investigación puede iniciar un camino sólido para la elaboración y desarrollo de un modelo robusto, que ofrezca mayor precisión en la predicción de plagas y enfermedades.

VII REFERENCIAS

Ahmed A., El-Azhari S., Ibrahim I., Edres S., y Mahmoid M., 1995, Experience with the development and deployment of expert system in agriculture. Central Lab. For Agricultural Expert Systems Ministry of Agriculture and Land Reclamation. P

Alcala-Fdez j., García S., Berlanga F.J., Fernández A., Sánchez L., Del Jesus M.J., y Herrera F., 2008. KEEL: A data mining software tool integrating genetic fuzzy systems. 3rd International Workshop on Genetic and Evolving Fuzzy Systems. Witten-Bommerholz. Alemania 83-88 p.

Alvarado P., Gonzalez A. Villasenor L., Propuesta de aplicación de redes de sensores en el modelado de cultivos protegidos y en campo. Proyecto D2ARS apoyado por el CYTED. Proyecto 5402 1360 1701.

Ameur S., Laghrouche M., y Adane A., 2001, Monitoring a greenhouse using a microcontroller-based meteorological data acquisition System. Renewable Energy. Tizi Ouzou, Algeria. 24:19-30.

Bai Y., y Lindhout P., 2007. Domestication and breeding of tomatoes: What have we gained and What can we gain in the future?. Oxford Journals. 100:1085-1094 p.

Bertona Federico L., 2005. Entrenamiento de redes neuronales basado en algoritmos evolutivos. Buenos Aires Argentina.

Blackmore B. S. and Griepentrog, H. W. 2002. A future view of Precision Farming. In *Proc. PreAgro Precision Agriculture Conf.*, eds. D. Berger, A. Bornheimer, A. Jarfe, D. Kottenrodt, R. Richter, K. Stahl, A. Werner, 131-145. Muncheberg, Gemrnay: Center for Agricultural Landscape and Land Use Research (ZALF).

Bongiovanni R., 2003, La agricultura de precisión en la cosecha. IDIA del INTA. <http://www.agriculturadeprecision.org/analecon/AgriculturaPrecisionenCosecha2003.pdf> (Consultado en septiembre 2008).

Cano R., Herrera F., y Lozano M., 2005, Extracción de modelos predictivos e interpretables en conjuntos de datos tamaño grande mediante la selección de conjuntos de entrenamiento. Granada España. Taller Nacional de Minería de Datos y Aprendizaje. 145-152 p.

Del Castillo J.A., Sanz De Galdeano J., Sadaba S., Uribarri A., y Aguado G. 2008. Invernaderos y control biológico. Navarra agraria. Navarra España. (166) 21-24 p.

Ehret D.L., Lau A., Bittman S., y Shelford T., 2001, Automated monitoring of greenhouse crops. *Agronomie*. 21:403-414.

Fayyad Usama, Piatetsky-Shapiro Gregory, and Smyth Padhraic, From Data Mining; Knowledge Discovery in Databases, *AI Magazine*, Fall 1996, pp. 37-54.

Ghoumari M., Tantau H., y Serrano J. 2005, Non-linear constrained MPC: real-time implementation of greenhouse air temperatura control. *Computers and Electronics in Agriculture*. (Publicación técnica No.1) 49: 345-3556 p.

Gomez Gonzalez S., Mercado Guitierrez J. Diaz Ortiz B.E., Guevara Lugo J., Valenzuela Solano C., Chavez Duron J.A., Piojan Aguade P. Sepulveda Betancourt J.I, 1998, Paquetes tecnológicas para el área de influencia del campo experimental “Costa de Ensenada”. Instituto de Investigaciones forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Goyal R., Ramirez H., 2007, Manejo de riego por goteo. Jain irrigation system. Segunda edición. <http://www.scribd.com/doc/19349212/Riego-Por-Goteo-Libro-Portada1> (Consultado en noviembre 2007).

He Young., Zhang Yun., G. Pereira A., Gomez H. A., y Wang Jun., 2005, Nondestructive determination of tomato fruit quality characteristics using Vis/NIR spectroscopy Technique. *International Journal of Information Technology*. Vol 11, No 11.97 108 p.

Herrero J.M., Blasco X., Martinez M., Ramors C., Sanchis J., 2007, Robust identification of non-linear greenhouse model using evolutionary algorithms. *Control Engineering Practice*.16: 515-530 p.

Jarvis W.R., 1998, Managing diseases in greenhouse crops. *The American Phytopathological Society*. 291 pp.

Linker R., y Seginer I., 2003, Greenhouse temperature modeling: a comparison between sigmoid neural networks and hybrid models. *Mathematics and Computers in Simulation*. 65: 19-29 p.

Liu Jiping, Eck Van J., Cong Bin., y Tanksley D. S., 2002, A new class of regulatory genes underlying the cause of pear-shaped tomato fruit. *The National Academy of Sciences*.vol (99) 20,13302-13306.

Monitoreo y control de temperatura ambiental y humedad del suelo en un invernadero de tomate riñón, utilizando comunicación inalámbrica. <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/bitstream> (Consultado en septiembre 2008).

Pohlheim H., y Heißner A., 1997. Optimal control of greenhouse climate using a short time climate model and evolutionary algorithms. *Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*.Großereen Alemania. 113-118 p.

Rodriguez F., Guzman J.L., Berenguel M., y Arahál M.R., 2007, Adaptive hierarchical control of greenhouse crop production. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 22:180-197.

Sanz Bobi M.A., y Besada Juez J.M. 2000. Reconocimiento visual de múltiples objetivos sobre una superficie con redes neuronales y su clasificación mediante un brazo robot. *Anales de mecánica y electricidad*. 39-47 p.

Shaxson F., y Baber R., 2005, Optimización de la humedad de suelo para la producción vegetal, el significado de la prosperidad del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/sb79s.pdf> (Consultado en Noviembre 2007).

Van der Knaao E., Tanksley S.D., 2003, The making of bell pepper-shaped tomato fruit:identification of loci controlling fruit morphology in yellow Stuffer tomato.*Theor Appl Genet*. 107: 139-147 p.

Wang C., Zhao C., Qiao X., y Zhang Y., 2008, The design of wireless sensor networks node for measuring the greenhouse's environment parameters. *Computer and Computing Technologies in Agriculture*.2: 1037-1045.

FAO. Food and Agriculture Organization. Retrieved from www.fao.org (Consultado en octubre de 2008).

INIFAP. Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias. Retrieved from <http://www.inifap.gob.mx> (Consultado en octubre de 2008)

Jscape. Retrieved from <http://www.jscape.com/sshfactory> (Consultado en mayo de 2008).

Römer et. al, 2004. Programming paradigms and middleware for sensor networks. *GI/ITG. Workshop on sensor networks*. Alemania. Febrero de 2004, 49-54 p.

SAGARPA. *Secretaria de agricultura, ganaderia, desarrollo rural, pesca y alimentacion*. Retrieved from <http://www.sagarpa.gob.mx> (Consultado en noviembre de 2008).

SAGARPA. *Servicio de informacion agroalimentaria y pesquera*. Retrieved from <http://www.siap.gob.mx> (Consultado en noviembre de 2008).

Sqlite. Retrieved from <http://www.sqlite.org> (Consultado en mayo de 2008).

Crossbow Technology. Retrieved from <http://www.xbow.com> (Consultado en mayo de 2008).

Apéndice A

Experimentos e interpretación de lecturas

A.1 Recolección de datos

Durante los periodos de Septiembre del 2008 a julio del 2009, se observaron dos cultivos: tomate perita y calabaza. Ambos cultivos se monitorearon desde la etapa de plantación hasta la cosecha. En el transcurso de este tiempo, se realizaron diferentes actividades, entre las cuales se encuentra, reconocimiento del lugar, instalación de equipo, observaciones, entre otras. A continuación se describen cada una de estas actividades.

A.1.1 Reconocimiento del área de estudio

En Acuacultura del Desierto (Ver figura 35), ubicada cerca de la población de San Antonio de las Minas en Ensenada B.C., se cultiva tanto a campo abierto como en invernadero. En ambos se cultiva tomate perita y calabaza principalmente. Sin embargo estas cosechas en el invernadero (ámbra 960), presentan altos porcentajes de merma a diferencia del cultivo a campo abierto, por lo que la mayoría de las observaciones y análisis de la presente investigación se realizaron en este invernadero. Por otra parte, es necesario conocer las condiciones en las que se encuentra el invernadero y cómo evoluciona durante las diferentes etapas del cultivo. A continuación se muestran una serie de imágenes en las que se observan las condiciones del invernadero antes del cultivo tomate perita (periodo septiembre diciembre).



r.

Es necesario realizar limpiezas externas en los invernaderos, debido a la constante actividad que se presenta al ingresar a estos. Debido a las bacterias que suelen y otros organismos que pueden trasportarse por medio del calzado o las herramientas que se utilizan. Por esta razón el invernadero cuenta con una puerta de seguridad para limpiar impurezas antes de ingresar en su totalidad a este, mismo que aun se encuentra en construcción.

A.1.2 Métodos de riego

Para la primera cosecha de tomate perita se instalo un sistema de riego por goteo, para tener un mayor control de la cantidad de agua para el cultivo. Para ello es necesario conocer la inclinación del terreno para una adecuada instalación del sistema de riego. Este sistema consta de mangueras con ranuras cada 10 cm. Estas se encuentran conectadas a una manguera de mayor diámetro por medio de la cual además del riego se introducen tratamientos para el cultivo. (Ver figura 36).



160,

A.1.3 Recopilación de los datos

Los diferentes tipos de sensores que existen en el mercado, se encuentran sujetos a normas que obligan a quienes los desarrollan, a mantener la calibración de los mismos. En gran parte es debido a las medidas estándares que deben seguir para entregar sensores de los cuales se obtengan datos reales o con la máxima precisión posible. Por otra parte la aplicación de dichos sensores en diferentes lugares, requiere de ajustes como lo es el ajuste del parámetro de la humedad. El cual es posible corregir por medio del uso de tensiómetros, los cuales indican la tensión con que el agua esta adherida a las partículas del suelo, es decir, verificar los niveles de humedad y mantener los más adecuados para el cultivo.

Por cada 300 metros de aumento en elevación sobre el nivel del mar, la presión atmosférica decae aproximadamente 3.5 cbars ó 26.6 milímetros de mercurio. Una lectura de 80 cbars en un tensiómetro al nivel del mar equivale a 62.5 cbars a 1,500 metros de elevación:

$$[(3.5/300 \times 1500 = 17.5), \text{ y } (-17.5 + 80 = 62.5)]. \quad (1)$$

Así pues, para el uso de cualquier sensor es necesario realizar ajustes en los datos proporcionados por estos sensores, debido a que el margen de error podría afectar considerablemente el cultivo al realizar prácticas excesivas o pobres en actividades como: riego, aplicación de fertilizantes, plaguicidas, entre otros.

A.1.4 Conexión ssh para la extracción de los parámetros del equipo Eko Pro Series

Para llevar a cabo la extracción de los datos del equipo EKO es necesario acceder a la base de datos del mismo y obtener solo los parámetros de interés para el modelo predictivo. Para ello se realizó una conexión ssh (Ver figura 37), con expectativas de tener más seguridad al aplicarse la herramienta de software del modelo predictivo en lugares en los que se tenga acceso a la red pública (internet). Esta conexión ssh se llevó a cabo por medio del apoyo de la biblioteca SQLite, a cual proporciona este tipo de conexión y los comandos auxiliares. A continuación se describe el código fuente para la conexión con el Gateway de Eko Pro Series.

```

/*
 * @(#)SshScriptExample.java
 * Copyright (c) 2001-2002 JScape
 * 1147 S. 53rd Pl., Mesa, Arizona, 85206, U.S.A.
 * All rights reserved.
 */
import com.jscape.inet.ssh.*;
import com.jscape.inet.ssh.util.SshParameters;
import java.io.*;
public class SshScriptExample extends SshAdapter {

    private Ssh ssh = null;
    private SshScript script = null;
    private OutputStream output = null;
    private static BufferedReader reader = null;

    public SshScriptExample(String hostname, String username, String password) throws IOException, SshException {
        //Se asigna el prompt que el gateway tiene para identificar cuando se puede ejecutar el siguiente comando
        String shellPrompt = "root@eko-10015:~#";
        // Ejecucion del query en la base de datos, utilizando la trayectoria del manejador de base de datos y la base de datos
        String command = "cat ./dbmsspt | /usr/xbow/xserve/bin/sqlite3 /usr/xbow/xserve/sys/xserve_sqlite.db";
        SshParameters sshParams = new SshParameters(hostname,username,password);
        ssh = new Ssh(sshParams);
        ssh.addSshListener(this);
        script = new SshScript(ssh);
        SshTask commandTask = new SshTask(shellPrompt,command,shellPrompt);
        script.addTask(commandTask);
        ssh.connect();
        while(!commandTask.isComplete()) {
            try {
                Thread.sleep(1000);
            } catch(Exception e) {} } ssh.disconnect();
    }
}

```

Figura 37: Conexión SSH.

```

public void connected(SshConnectedEvent event) {
    System.out.println("Connected to host: " + event.getHost());
}
public void disconnected(SshDisconnectedEvent event) {
    System.out.println("Disconnected from host: " + event.getHost());
}
public void dataReceived(SshDataReceivedEvent event) {
    System.out.print(event.getData());    }

public static void main(String[] args) {
    try {
        reader = new BufferedReader(new InputStreamReader(System.in));

        //Se transfiere al gateway el archivo con los querys que se solicita a la base de datos
        Process miProceso = Runtime.getRuntime().exec("pscp.exe -q -pw crossbow dbmsspt admin@192.168.1.77:./");
        // Process miProceso = Runtime.getRuntime().exec("pscp.exe -q -pw crossbow dbmsspt admin@iio.ens.uabc.mx:./");
        Thread.sleep(3000);
        // ... inicia.
        //Se genera la conexion a traves del ssh para ejecutar los querys en el gateway
        SshScriptExample example = new SshScriptExample("192.168.1.77","admin","crossbow");
        // SshScriptExample example = new SshScriptExample("192.168.1.77","adm","crossbow");
        //Transfiere el resultado de los querys a la pc, utilizando un security copy
        Process miProceso2 = Runtime.getRuntime().exec("pscp.exe -q -pw crossbow admin@192.168.1.77:./sensor* .\\");
        // Process miProceso2 = Runtime.getRuntime().exec("pscp.exe -q -pw crossbow admin@iio.ens.uabc.mx:./sensor* .\\");
    } catch (Exception e) {        e.printStackTrace(System.out);    }    }

```

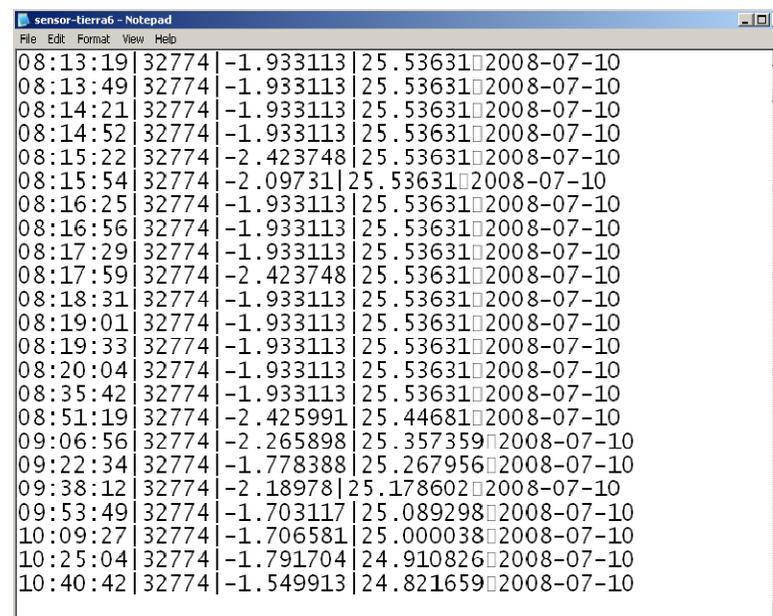
Figura 37: Conexión SSH. (Continuacion)

Extracción de parámetros del equipo Eko Pro Series

Una vez que se ha realizado la conexión entre el Gateway y la aplicación es necesario obtener los parámetros que se requieren para el modelo predictivo. Para ello se envía un archivo en el que especificando cada uno de ellos. En la figura 39 y 40 se muestra un ejemplo de los archivos de solicitud de datos y el almacenamiento de las lecturas de los sensores. La administración del envío y solicitud de datos se muestra en la figura 41.

```
.header off
.mode list
.separator |
.output sensor-tierra1
select * from eS1101_sensor_results where nodeId=32768;
.output sensor-tierra2
select * from eS1101_sensor_results where nodeId=32772;
.output sensor-tierra3
select * from eS1101_sensor_results where nodeId=32770;
.output sensor-tierra4
select * from eS1101_sensor_results where nodeId=32771;
.output sensor-tierra5
select * from eS1101_sensor_results where nodeId=32773;
.output sensor-tierra6
select * from eS1101_sensor_results where nodeId=32774;
.output sensor-amb1
```

Figura 38: Archivo para la solicitud de datos.



Timestamp	nodeId	Value 1	Value 2
08:13:19	32774	-1.933113	25.53631
08:13:49	32774	-1.933113	25.53631
08:14:21	32774	-1.933113	25.53631
08:14:52	32774	-1.933113	25.53631
08:15:22	32774	-2.423748	25.53631
08:15:54	32774	-2.09731	25.53631
08:16:25	32774	-1.933113	25.53631
08:16:56	32774	-1.933113	25.53631
08:17:29	32774	-1.933113	25.53631
08:17:59	32774	-2.423748	25.53631
08:18:31	32774	-1.933113	25.53631
08:19:01	32774	-1.933113	25.53631
08:19:33	32774	-1.933113	25.53631
08:20:04	32774	-1.933113	25.53631
08:35:42	32774	-1.933113	25.53631
08:51:19	32774	-2.425991	25.44681
09:06:56	32774	-2.265898	25.357359
09:22:34	32774	-1.778388	25.267956
09:38:12	32774	-2.18978	25.178602
09:53:49	32774	-1.703117	25.089298
10:09:27	32774	-1.706581	25.000038
10:25:04	32774	-1.791704	24.910826
10:40:42	32774	-1.549913	24.821659

Figura 39: Archivo de datos de sensores.

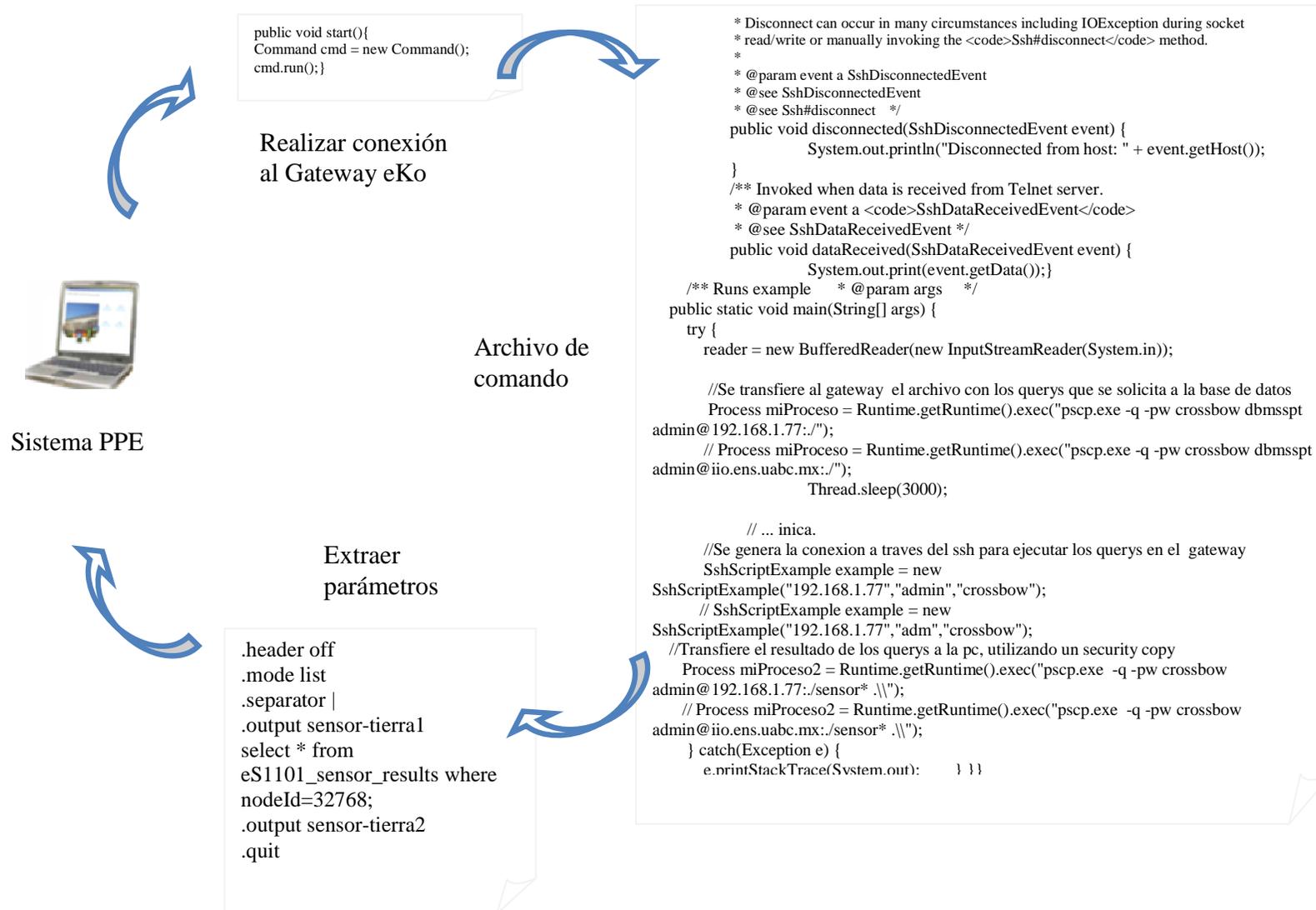


Figura: 40: Documentos compartidos en la conexión DBMS Eko y DBMS PPE.

Apéndice B

Recomendaciones

En el apéndice A, se muestran las áreas que deben estar limpias y protegidas de aquellos microorganismos y partículas que pueden dañar al cultivo. En esta sección encontraran algunas recomendaciones que surgen a raíz de las observaciones en Acuicultura del desierto.

Cultivos a campo abierto e invernadero

En los cultivos a campo abierto se tienen mayores oportunidades de enfrentar las plagas y enfermedades que se presentan, debido a la presencia de la ventilación natural que se presenta de forma constante. Sin embargo es necesario realizar (inifap,2008):

- Limpiezas después de cada cosecha.
- Evitar la siembra del mismo cultivo en el mismo lugar, para evitar que se desgasten los nutrientes naturales de la tierra y de esta forma también se evita la contaminación por los productos que se utilizan para la prevención o corrección de la presencia de plagas y enfermedades.
- Eliminar maleza.
- Preparar el suelo.
- Usar semilla sana y tratada.
- Realizar análisis de agua y de suelo para conocer sus propiedades. De esta forma obtendrá información relevante para el uso adecuado de estos recursos y de los productos para los mismos.
- Informarse acerca de los requerimientos del suelo, para conocer las cantidades de fertilizantes que requiere.

- Es importante evitar accidentes que dañen las paredes del invernadero, debido a que facilitan una entrada a bacterias y plagas principalmente. (Ver figura 41).



Figura 41: Ruptura en invernadero.

B.1 Experimentos

Debido a la inclinación del terreno y a la localización del sistema de riego se observaron cambios significativos en el crecimiento del cultivo, es decir: mientras en unas áreas el cultivo se encontraba en la segunda etapa fenológica, en otras iniciaba o en su defecto por el exceso de agua se observaba la presencia de moho y otros microorganismos, que daban origen las enfermedades de la planta, entre las cuales se destacan marchitez y podredumbre. (Ver figura 42).



Figura 42: Presencia de moho.

Debido a estos cambios, fue necesario cambiar el tipo de riego. Esto es, se taparon los orificios de la mitad del invernadero, mientras la otra mitad se regaba, y viceversa. Así la primera mitad no recibía exceso de agua. (Ver figura 43).



En las siguientes semanas se observó un cambio notable en el comportamiento del cultivo, nivelándose considerablemente el tamaño de este. Sin embargo los efectos elevaron la merma de la cosecha tomate perita.

Apéndice C

Diagramas de clases y emplazamiento

En la figura 44, se muestra el diagrama global de emplazamiento y de componentes del sistema. El componente WSN, representa la red de sensores y el equipo Eko. En el componente de manejador de cultivo, se encuentran los subcomponentes relacionados a los requerimientos del cultivo y las plagas y enfermedades. Para el componente de manejador de predicción, es el que se encarga de la comparación entre umbrales de los parámetros antes mencionados. Y finalmente se tiene el manejador de BD, que es el que se encarga de intercambiar los datos desde la BD Eko a la BD PPE.

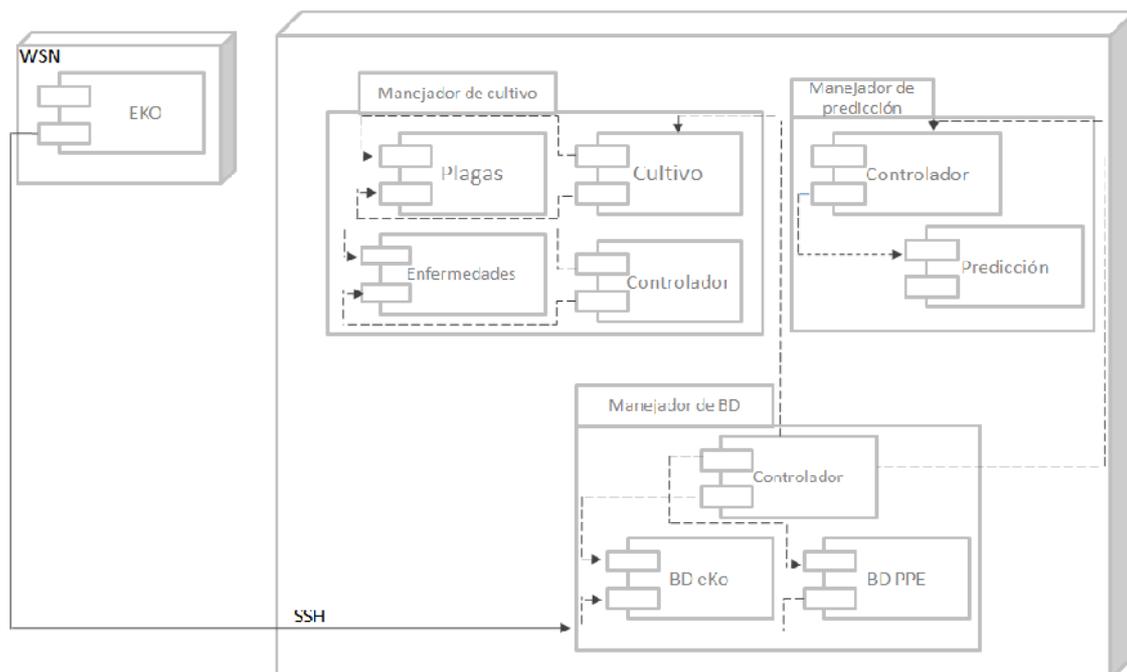


Figura 44: Diagrama de emplazamiento que representa el modelo predictivo prototipo.

A continuación en la figura 45 se describe el diagrama de clases del comportamiento de la base de datos, en la cual se pueden observar las características de cada una de las tablas utilizadas para proveer la funcionalidad del sistema en general.

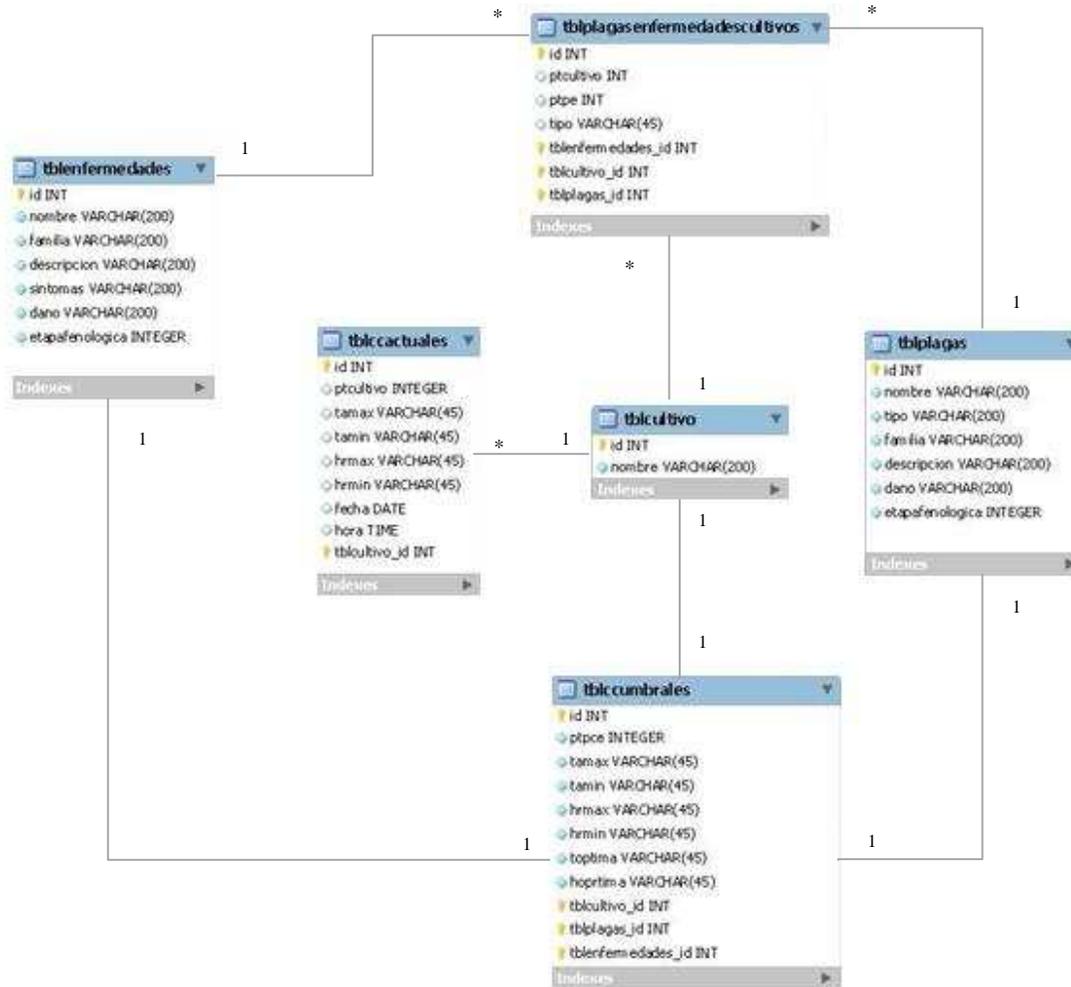


Figura 45: Diagrama que representa la relación entre clases.