

TESIS DEFENDIDA POR

Rolando Arturo Cárdenas Tamayo

Y aprobada por el siguiente comité:

Dr. José Antonio García Macías

Director del Comité

Dr. Jesús Favela Vara

Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván

Miembro del Comité

M.C. Leocundo Aguilar Noriega

Miembro del Comité

Dr. Pedro Gilberto López Mariscal

*Coordinador del Programa de Posgrado
en Ciencias de la Computación*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

*Director de Estudios
de Posgrado*

26 de Noviembre de 2008

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

**Monitoreo con Redes Inalámbricas de Sensores
para Apoyo en la Toma de Decisiones
en Cultivos Protegidos**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Rolando Arturo Cárdenas Tamayo

Ensenada, Baja California, México. Noviembre de 2008.

RESUMEN de la tesis que presenta **Rolando Arturo Cárdenas Tamayo**, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN. Ensenada, Baja California. Noviembre de 2008.

Monitoreo con Redes Inalámbricas de Sensores para Apoyo en la Toma de Decisiones en Cultivos Protegidos

Resumen aprobado por:

Dr. José Antonio García Macías
Director de Tesis

El monitoreo con redes inalámbricas de sensores, tiene aplicación en múltiples disciplinas, ya que puede utilizarse en diversos entornos. Además, puede apoyar a la construcción de sistemas ubicuos con dispositivos embebidos en el ambiente físico, que den soporte a aplicaciones concientes de contexto y de esta manera hacer realidad el concepto de cómputo ubicuo propuesto por Mark Weiser.

El sector agrícola representa una de las fuentes más importantes de ingreso y producción alimentaria en México. Dada su gran importancia surge la necesidad de utilizar técnicas como la agricultura de precisión para incrementar la eficiencia del uso de los recursos durante la producción de cultivos. La presente investigación aborda algunos de los problemas que presenta el monitoreo de cultivos protegidos, así como el uso de las redes inalámbricas de sensores como apoyo en la toma de decisiones en el manejo de las cosechas, que a la larga ayudará a obtener productos de mayor calidad a un menor costo.

Nosotros llevamos acabo el diseño e implementación de un sistema software prototipo, para apoyo en las tareas de fertirrigación y estimación del crecimiento de un cultivo. La incorporación de una red inalámbrica de sensores es una parte importante de este prototipo. Así mismo, se realizó un experimento de evaluación utilizando el prototipo desarrollado con los usuarios potenciales. Esto permitió conocer su percepción en cuanto a utilidad, facilidad e intención de uso. Este trabajo brinda las herramientas necesarias para lograr un manejo adecuado de los recursos necesarios para el crecimiento de un cultivo, y así impulsar al sector agrícola a las exigencias y modo de trabajo demandantes del siglo XXI.

Palabras clave: Redes Inalámbricas de Sensores, Monitoreo, Cultivos Protegidos, WSN, Toma de Decisiones.

ABSTRACT of the thesis presented by **Rolando Arturo Cárdenas Tamayo**, as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in COMPUTER SCIENCE. Ensenada, Baja California. November 2008.

Monitoring with Wireless Sensor Networks for Decision Support in Protected Crops

Abstract approved by:

Dr. José Antonio García Macías
Thesis director

Wireless sensors monitoring has applications in multiple disciplines and can be used in different environments. It can also support the construction of ubiquitous systems with devices embedded in the physical environment for the support of context aware applications, helping to make real the concept of ubiquitous computing proposed by Mark Weiser.

The agricultural sector represents one of the largest sources of income and food production in Mexico. Given its importance, the need arises to use techniques such as precision agriculture to increase the efficiency of resource use during the production of crops. This research addresses some of the problems in the monitoring of protected crops, as well as the use of wireless sensor networks as decision-making support in the management of crops, which could help to obtain products of higher quality at lower cost.

We conducted the design and implementation of a prototype software system to support in the work of fertigation and an estimate of growth crop. The incorporation of wireless sensor networks was an important part of this prototype. Experimental evaluations were carried out where potential users assessed the prototype. This allowed to know their perception about usefulness, ease and intention of use. This work provides the tools necessary to achieve a proper management of resources needed for the growth of a crop, and thus boost the agricultural sector to the ever increasing demands of our world.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Monitoring, Protected Crops, WSN, Decision Support.

Dedicatoria

A Valeria Manzanilla y a mis padres

José Cardenas e Irene Tamayo

por su apoyo y cariño

De gente bien nacida es agradecer los beneficios que recibe

– Miguel de Cervantes (1547-1616)

Agradecimientos

*A mi asesor, Dr. J. Antonio García Macías,
por su atención, consejos y apoyo.
Sobre todo por su confianza.*

*A los miembros de mi comité, Dr. Jesús Favela Vara,
Dr. Roberto Conte Galván y M. en C.
Leocundo Aguilar Noriega por su
tiempo e invaluable observaciones.*

*A mi familia, mis padres y mis hermanos,
por su apoyo y comprensión.*

*A los Maestros en Ciencias Edgardo Avilés y Leonardo Galicia
y a la Dra. Mónica Tentori por sus valiosos consejos
que hicieron posible el desarrollo de esta tesis*

*A mis amigos en el COOLAB Laboratorio de
Cómputo Colaborativo por los ratos de ocio.*

*A los Oceanólogos Enrique Strassburger
y Naielli Estavillo por su hospitalidad
durante las visitas a Acuicultura del Desierto*

*A la Facultad de Ingeniería y Negocios de la UABC
y a su director Dr. Jesús Salvador Ruiz Carvajal*

*Al Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de la ciudad de Ensenada, Baja California.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,
por su apoyo económico sin el cual no hubiera
sido posible este trabajo de investigación.*

Tabla de Contenido

Capítulo	Página
I. Introducción	1
I.1. Planteamiento del problema	3
I.2. Objetivo	4
I.2.1. Objetivos específicos	4
I.3. Preguntas de investigación	4
I.4. Metodología	5
I.5. Contenido	7
II. Monitoreo de Cultivos Protegidos con Redes Inalámbricas de Sensores	9
II.1. Redes inalámbricas de sensores para monitoreo de cultivos	10
II.1.1. Redes inalámbricas de sensores en la agricultura	11
II.2. Iniciando el monitoreo de cultivos protegidos	12
II.2.1. Instalación de una red inalámbrica de sensores	12
II.2.2. Recopilando información de la red de sensores	15
II.3. Monitoreo del crecimiento de un cultivo	16
II.3.1. Fenología	17
II.3.2. Fenología en la agricultura	18
II.3.3. Unidades calor acumuladas	19
II.4. Fertirrigación en cultivos	21
II.4.1. Nutrición de cultivos	21
II.4.2. Relaciones Agua, Suelo y Planta	23
II.4.3. Análisis de agua de riego	24
II.4.4. Análisis de suelo	25
II.4.5. Análisis de fertilizante	26
II.5. Conclusión	26
III. Arquitectura para Monitoreo de Cultivos	28
III.1. Requerimientos de la arquitectura	29
III.2. Trabajo previo	31
III.2.1. eKo Pro Series	31
III.2.2. Monitoreo automatizado de las hortalizas de invernadero	32
III.2.3. Una red inalámbrica de sensores prototipo para monitoreo ambiental en invernaderos	33
III.2.4. CIAT	33
III.2.5. SIPPEM	34
III.3. Diseño de una arquitectura para monitoreo con WSN	35
III.3.1. Manejador de Plugins	36
III.3.2. Registro de Plugins	36
III.3.3. Manejador de Cápsulas	37
III.4. Conclusión	37

Tabla de Contenido (Continuación)

Capítulo	Página
IV. Diseño e Implementación de un Prototipo	39
IV.1. Plataforma de <i>hardware</i>	40
IV.1.1. WSN Professional Kit	40
IV.1.2. eKo PRO Series	40
IV.2. Implementación	42
IV.2.1. Sistema de monitoreo para cultivos protegidos	43
IV.2.2. Plugin para predicción de crecimiento	47
IV.2.3. Plugin para fertirrigación	50
IV.3. Conclusión	56
V. Evaluación, Resultados y Discusión	57
V.1. Objetivo de la evaluación	57
V.2. Diseño del experimento	58
V.2.1. Variables del experimento	58
V.2.2. Muestra	59
V.2.3. Tareas a realizar	59
V.2.4. Condiciones del experimentos	61
V.2.5. Procedimientos	61
V.3. Resultados y discusión	61
V.3.1. Utilidad percibida de uso	62
V.3.2. Facilidad percibida de uso	63
V.3.3. Confiabilidad percibida	64
V.3.4. Disposición de adopción	65
V.3.5. Experiencias recabadas	66
V.3.6. Conclusiones	67
VI. Conclusiones	69
VI.1. Aportaciones	70
VI.2. Trabajo Futuro	71
Bibliografía	72
A. Acerca de los Grados-Día	75
A.1. Umbrales de desarrollo	75
A.2. Grado-día	76
A.3. Métodos para calcular los Grados-Día	77
A.3.1. Métodos del Triángulo	77
A.3.2. Métodos del Seno	78
A.3.3. El método de Huber	79
A.3.4. Métodos de cutoff	81
A.3.5. Método de cutoff horizontal	81

Tabla de Contenido (Continuación)

Capítulo	Página
A.3.6. Método de cutoff intermedio	81
A.3.7. Método de cutoff vertical	81
B. Acerca de las Soluciones Nutritivas	82
B.1. Soluciones nutritivas balanceadas	82
B.1.1. pH	82
B.1.2. Conductividad eléctrica	83
B.1.3. Cálculo de una solución nutritiva	83
B.1.4. Cálculo de una solución nutritiva balanceada	84
C. Formatos y Tablas	89
C.1. Tabla de Métricas Para Interpretación del Análisis de Agua	89
C.2. Tabla de Métricas Para Interpretación del Análisis de Suelo	90
C.3. Formato de Análisis de Agua y Suelo (Hoja 1)	91
C.4. Formato de Análisis de Agua y Suelo (Hoja 2)	92
D. Manual de Usuario	93
D.1. Requerimientos mínimos	93
D.2. Instalación	93
D.3. Ejecución	95
D.4. Operación del sistema	95
D.4.1. Plugin de crecimiento	95
D.4.2. Plugin de fertirrigación	101
E. Cuestionario de Evaluación Final	110

Lista de Figuras

Figura	Página
1. Metodología aplicada durante las etapas de diseño e implementación. . . .	5
2. Gráfica que representa la calidad de la señal en un invernadero Ambar 960 .	13
3. Instalación de una red de sensores en un invernadero Ambar 960	14
4. Captura de pantalla de un visor para WSN en dispositivos iPhone	15
5. Gráfica que representa la humedad ambiental registrada por una WSN du- rante un periodo mensual	16
6. Sistema de monitoreo para cultivos protegidos	17
7. Curva de desarrollo de un cultivo	19
8. Calculo del requerimiento térmico	20
9. Arquitectura para monitoreo de cultivos	35
10. Escenario de aplicación de un sistema para monitoreo de cultivos con WSN	38
11. Nodo y sensor de kit eKo PRO Series (Crossbow, 2008)	41
12. Diagrama UML de emplazamiento que representa al sistema prototipo . . .	43
13. Diagrama UML de clases representa al sistema prototipo	44
14. Diagrama UML de caso de uso que representa el escenario de predicción de crecimiento de un cultivo	47
15. Captura de pantalla del plugin de predicción de crecimiento	48
16. Captura de pantalla de la ventana de genotipo	49
17. Captura de pantalla de la ventana de resultados para la predicción de creci- miento	50
18. Diagrama UML de secuencia que representa la interacción del usuario con el sistema durante en el proceso de fertirrigación	51
19. Captura de pantalla del plugin de fertirrigación	52
20. Captura de pantalla de la ventana de solución nutritiva	53
21. Captura de pantalla de la ventana de cultivo	54
22. Captura de pantalla de la ventana de los análisis de agua y suelo	55
23. Captura de pantalla de la ventana de los resultados de fertirrigación	56
24. Resultados de la predicción del crecimiento para un cultivo de maíz	60
25. Resultados de la predicción del crecimiento para un cultivo de maíz	60
26. Porcentaje de confiabilidad	65
27. Modelo de adopción de la tecnología	65
28. Frecuencias obtenidas en las preguntas sobre intensidad de uso	66
29. Frecuencia total obtenida por cada uno de los valores de la escala (1 a 5) . . .	68
30. Umbrales y acumulación de grados-día	76
31. La acumulación de grados-día representados en unidades Fahrenheit y Celsius	76
32. El método del triángulo simple para grados-día acumulados	78
33. El método del doble triángulo para grados-día acumulados	78
34. El método del seno simple para grados-día acumulados	79
35. El método del seno doble para grados-día acumulados	79

Lista de Figuras (Continuación)

Figura	Página
36. Seis posibles relaciones pueden existir entre la temperatura diaria, y los umbrales superior e inferior	80
37. Triangulo de Steiner	84
38. Resultados de un análisis de agua	85
39. Concentración calculada de aniones	85
40. Concentración calculada de cationes	86
41. Concentración real de aniones	86
42. Concentración real de cationes	87
43. Resultados de un análisis de agua	87
44. Resultados de un análisis de agua	88
45. Archivo de configuración del sistema	94
46. Captura de la pantalla principal del plugin de crecimiento	95
47. Captura de pantalla de la ventana de selección de cultivos	96
48. Captura de pantalla que representa la selección del método del estimación de los grados-días	97
49. Captura de pantalla que representa la selección de un archivo de datos histórico	98
50. Contenido del archivo de datos históricos	99
51. Captura de pantalla de la ventana de predicción de crecimiento	100
52. Captura de pantalla de la ventana de registro de grados-días acumulados	100
53. Captura de pantalla de la ventana de fertirrigación	101
54. Captura de pantalla de la ventana de solución nutritiva	102
55. Archivo XML donde se almacenan las soluciones nutritivas	103
56. Archivo XML donde se almacenan los fertilizantes	103
57. Captura de pantalla de la ventana cultivo	104
58. Archivo de almacenamiento de la información de los cultivos	105
59. Formato de captura del análisis de agua	106
60. Archivo XML para almacenamiento de los análisis de agua	106
61. Captura de pantalla de la ventana de resultados del análisis de agua	107
62. Archivo de configuración del sistema	108
63. Captura de pantalla de la ventana de resultados del análisis de suelo	108
64. Captura de pantalla que presenta los resultados del calculo de nutrientes para un cultivo dado	109

Lista de Tablas

Tabla	Página
I. Relación de preguntas por grupos	62
II. Escala propuesta	62
III. Resultados obtenidos para Utilidad Percibida	62
IV. Resultados obtenidos para Facilidad Percibida de Uso	63
V. Resultados obtenidos para Confiabilidad	64
VI. Resultados del calculo de la solución nutritiva	88

Capítulo I

Introducción

*«Lo que sabemos es una gota de agua;
lo que ignoramos es el océano»*

– Isaac Newton (1642-1727)

Las redes inalámbricas de sensores WSN por sus siglas en inglés, son un tipo de red ad-hoc, formadas por pequeños dispositivos con recursos muy limitados (batería, memoria, procesador). Nacieron gracias al gran avance de los sistemas microelectromecánicos «MEMS», lo que permitió lograr costos adecuados, tamaño reducido, bajo consumo de potencia y procesamiento limitado (Conti y Giordano, 2007).

Su aplicación es multidisciplinaria ya que puede utilizarse en entornos industriales, militares, seguridad, domótica, automoción, detección ambiental y en la medicina (Rabaey et al., 2000). Entre sus características se encuentran la facilidad con la que comunican la información, su autoconfiguración, la tolerancia a fallos, las limitaciones del *hardware* y la administración eficiente de la energía (Akyildiz et al., 2002). Entre sus principales ventajas se encuentran el hecho de permitir formar redes inalámbricas ad-hoc, sin contar con una infraestructura física y la necesidad de una administración central.

Actualmente la visión que se tiene de las redes inalámbricas de sensores va dirigida a la creación de una Internet embebida. Dicho concepto se refiere a una red en donde existan redes de dispositivos embebidos en el ambiente físico, de tal manera que se brinde una transformación en múltiples campos de la ciencia, al proveer un conjunto de herramientas

que permitan obtener información detallada sobre espacios amplios, naturales y artificiales (Culler y Hong, 2004).

Existen muchos tipos de sensores que puede incluir un nodo, entre los más comunes se encuentran: temperatura, humedad, movimiento, presión atmosférica, entre otros. El objetivo de contar con un grupo de estos, es crear una red de sensores que pueda brindar información del medio donde se encuentran. Hoy en día, su utilización en muchas áreas de la vida diaria va en incremento. Un ejemplo claro es, su uso en el desarrollo de aplicaciones de redes de sensores para monitorear fenómenos naturales (Tanenbaum et al., 2006). Su utilización en áreas como la agricultura puede ser de gran apoyo en la mejora de la productividad en los campos de cultivo. Las mejoras en el manejo de la producción y la calidad de los cultivos proveen de un control más exacto de los parámetros ambientales. El control de dichos parámetros reduce el despilfarro de muchos recursos naturales y económicos necesarios para la producción de cultivos.

La investigación actual en redes inalámbricas de sensores se ha conducido sobre el diseño de: arquitecturas, protocolos, *hardware*, métodos para ahorro de energía, sistemas tolerantes a fallos, esquemas de seguridad y optimizaciones en general; sin embargo muchas de estos problemas se han abordado en la mayoría de los casos desde un punto de vista teórico (Conti y Giordano, 2007). Las experiencias generadas a lo largo de años de investigación, han mostrado que la teoría no es aplicable directamente, incluso en muchos de los trabajos anteriormente mencionados, no se ha tomado en cuenta los retos reales de aplicación que en este tipo de ambientes dinámicos se pueden presentar.

El enfoque de este trabajo es lograr una solución práctica, sustentada en problemas reales, en la que exploraremos el uso de las redes inalámbricas de sensores en su aplicación para el desarrollo de cultivos protegidos.

I.1. Planteamiento del problema

El sector agrícola representa una de las fuentes más importantes de ingreso y producción alimentaria en México, de lo anterior su gran importancia a nivel nacional. Sin embargo existe un gran rezago en materia tecnológica en comparación a países desarrollados. Mucho de esto se debe a la incosteabilidad de la tecnología de alta inversión, la que se basa en insumos de alto costo, normalmente importados y no siempre usados en forma eficiente.

Lo anterior da origen a productos agrícolas caros que no compiten en el mercado nacional con los productos agrícolas importados. Para corregir el problema es necesario que la agricultura del futuro cuente con una sólida base científica (de~Alba, 2000). De tal forma que es necesario diseñar técnicas de bajo costo que garanticen:

- El monitoreo constante de los parámetros climáticos.
- Caracterización del suelo del cultivo y el agua de riego.
- EL uso adecuado de los fertilizantes en la nutrición de los cultivos.
- Recolección del estado de las cosechas en tiempo real.
- La reducción del impacto ambiental.

La agricultura de precisión es una tecnología utilizada en diversas partes del mundo para incrementar la eficiencia del uso de los recursos durante la producción de cultivos. Desde su adopción en el sector agrícola se han generado un gran número de investigaciones con un buen número de soluciones disponibles. Aunque la mayoría están enfocadas al manejo de cultivos en regiones particulares, lo que trae consigo que la solución no pueda ser aplicada en otras situaciones. Por lo que de la gran cantidad de soluciones existentes, muchas de ellas no son flexibles, heterogéneas, reutilizables o simplemente sencillas de utilizar.

I.2. Objetivo

Proponer y evaluar un sistema de software para monitoreo y apoyo en la toma de decisiones durante el crecimiento de cultivos protegidos utilizando redes inalámbricas de sensores, de tal forma que su uso tenga un impacto en el manejo y costos de las cosechas.

I.2.1. Objetivos específicos

- Estudiar los factores que afectan el crecimiento de los cultivos protegidos, y determinar que parámetros son necesarios monitorear para obtener un producto de calidad.
- Proponer un sistema para monitoreo de cultivos protegidos, mediante el uso de redes inalámbricas de sensores, que de soporte a la toma de decisiones.
- Incorporar un modelo de crecimiento y desarrollo para cultivos al sistema de monitoreo propuesto.
- Diseñar e implementar una aplicación que permita llevar a cabo el monitoreo de un cultivo protegido, mediante el uso de los principios de la arquitectura propuesta.
- Evaluar el impacto de la aplicación de una red de sensores para el monitoreo del crecimiento de cultivos protegidos.

I.3. Preguntas de investigación

El presente trabajo pretende responder a las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el impacto de la aplicación de una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de un cultivo protegido?
- ¿Cuáles son las técnicas existentes para monitorear un cultivo protegido?
- ¿Cuáles son las características y consideraciones especiales que se tienen que tomar en cuenta para monitorear cultivos protegidos?

- ¿Cuáles son las características que debe poseer una arquitectura de software para monitoreo de cultivos, de tal forma que se aprovechen las bondades de las redes inalámbricas de sensores?
- ¿Cómo podemos adaptar un prototipo de software para el monitoreo de cultivos, en base a la arquitectura propuesta?
- ¿Que tanto facilita un sistema de software, la realización de las tareas de fertirrigación y predicción del crecimiento de un cultivo?
- ¿Que tan útil es, un sistema de software para la elaboración de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo?
- ¿Que tanta intención de uso hay por parte de los usuarios, hacia un sistema de software para la elaboración de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo?
- ¿Que tan confiables son los resultados arrojados, por un sistema de software para la elaboración de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo, en comparación a los del método tradicional?

I.4. Metodología

La metodología de investigación utilizada para el desarrollo de este trabajo es de cascada, la cual consta de 5 etapas, que se muestran en la Figura 1.

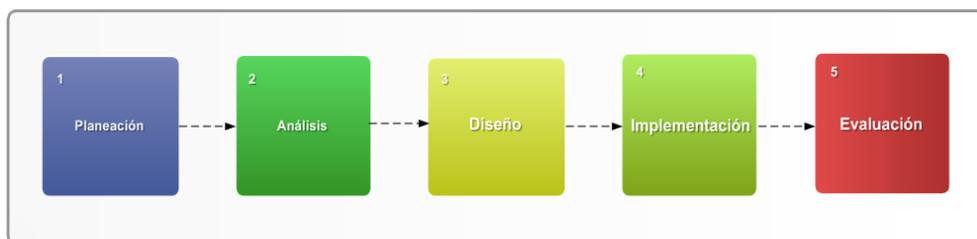


Figura 1: **Metodología aplicada durante las etapas de diseño e implementación.**

Se seleccionó esta metodología ya que permite la depuración del diseño de manera continua, lo que eventualmente arrojará resultados cada vez más completos. En seguida se describen cada una de las actividades llevadas a cabo, en cada una de las diferentes etapas recorridas durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Etapa 1. Inicialmente se realizó la instalación de una red de sensores en un invernadero desde la cual se inició la recopilación de datos climáticos, enseguida se inició la revisión de la bibliografía, para así tener conocimiento de los alcances y limitaciones que se tienen en el área de estudio.

Etapa 2. Durante el desarrollo de esta etapa se analizó toda la información previamente recopilada para identificar las áreas de oportunidad y los requerimientos necesarios para desarrollar una arquitectura de monitoreo de cultivos basada en redes inalámbricas de sensores. De forma complementaria se inició la asistencia a un diplomado sobre *Sistemas de Producción en Agricultura Protegida*, impartido por la Universidad Autónoma de Baja California, esto para adquirir los conocimientos específicos sobre los procesos agrícolas abordados durante este trabajo de investigación.

Etapa 3. En esta etapa se realizó el diseño de una arquitectura para monitoreo, que brinda soporte al uso de redes inalámbricas de sensores, así como a la incorporación de nuevos componentes a través del manejo de *plugins*. Dicha arquitectura está basada en requerimientos recolectados a través del análisis de la literatura realizado en la etapa número 2.

Etapa 4. Se llevó a cabo la implementación de un sistema, por medio del cual se realiza la predicción del crecimiento de un cultivo y el cálculo de la cantidad de nutrientes necesarios para el crecimiento de éste. La implementación fue realizada utilizando la tecnología Java SE 6 y el *middleware* ActiveCloud (Olea, 2008).

Etapa 5. Finalmente se realizó una evaluación sobre la aceptación de la tecnología desarrollada con estudiantes de agronomía, en la cual realizaron diferentes tareas utilizando el prototipo desarrollado. De tal evaluación se obtuvieron resultados que posteriormente fueron discutidos, en los capítulos finales de este trabajo.

I.5. Contenido

El contenido de esta tesis está organizado en siete capítulos y cuatro apéndices, los cuales se describen de manera breve a continuación:

En el Capítulo II se presentan la mayoría de las técnicas existentes para monitoreo de cultivos, se definen las ventajas que brindan las redes inalámbricas de sensores en la realización de dichas actividades, así como los parámetros necesarios a medir para lograr una producción de mayor calidad a menor costo.

El Capítulo III presenta una explicación detallada del proceso de desarrollo de un cultivo protegido, además se mencionan las variables necesarias para el manejo correcto de dicho proceso. Adicionalmente se brinda una introducción al proceso de fertirrigación, y se concluye con una descripción de forma en la que se estima el tiempo de crecimiento de un cultivo.

En el Capítulo IV se describe la etapa de diseño y de la arquitectura para monitoreo de cultivos propuesta, que da soporte al uso de redes inalámbricas de sensores. Se describen los requerimientos que dieron origen a dicha arquitectura, así como las mejoras incluidas durante su diseño.

EL Capítulo V describe la etapa de implementación de una aplicación prototipo basada en la arquitectura propuesta en el capítulo IV, se describe la implementación de dos *plugins*, el primero para la predicción del crecimiento de un cultivo y el siguiente para el

cálculo de la necesidad de nutrientes para un cultivo dado.

El capítulo VI presenta la evaluación del prototipo desarrollado, se describen cada una de las tareas realizadas durante dicha evaluación, así como las impresiones de los estudiantes de agronomía de la escuela de Ingeniería y Negocios de la UABC. Al final del capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos durante dicha evaluación.

Por último en el capítulo VII se presentan las conclusiones, aportaciones y trabajo futuro que se generaron de los resultados obtenidos al finalizar el presente trabajo de investigación.

Monitoreo de Cultivos Protegidos con Redes Inalámbricas de Sensores

*«Si quieres alcanzar lo más alto
empieza por lo más bajo»*

– Syrus (40 A.C.- 45 D.C.)

La protección de los cultivos se ha convertido en una necesidad imperiosa para la agricultura moderna y competitiva. La producción anticipada, fuera de estación, la alta calidad de los productos (sin daños por agentes climáticos o por plagas) y de alta productividad (cultivos forzados o semiforzados) implican el uso de una serie de tecnologías que se enmarcan dentro del concepto de cultivo protegido.

Podemos entonces definir a los cultivos protegidos como todos aquellos cultivos que se producen bajo un microclima que los protege de factores como viento, lluvia, plagas, enfermedades, hierbas y animales. Esta protección permite al agricultor controlar la temperatura, la cantidad de luz y aplicar efectivamente un control químico y biológico para proteger al cultivo.

En este capítulo se muestra en qué consiste el monitoreo de cultivos protegidos y el contexto en el que se desarrolla el presente proyecto de investigación. Además se presentan las técnicas existentes para el monitoreo del crecimiento de cultivos, así como la forma en que se determinan sus necesidades nutrimentales. De forma complementaria se analizan las ventajas de llevar a cabo el monitoreo de los parámetros anteriormente mencionados,

así como su impacto en la producción.

II.1. Redes inalámbricas de sensores para monitoreo de cultivos

El concepto de agricultura de precisión es definido como un sistema diseñado para optimizar la producción agrícola cuidadosamente, adaptando los suelos y la gestión de los cultivos a las condiciones particulares de la región donde se encuentre, de tal forma que se mantenga la calidad del medio ambiente (Blackmore, 1994). Para lograr sus objetivos, la agricultura de precisión se apoya de tareas como el monitoreo de cultivos, ya que representa una excelente manera de obtener información precisa sobre el área donde se trabaja.

El monitoreo de cultivos conlleva muchos retos. Es necesario contar con métodos que de manera continua y automática detecten: potenciales problemas en las cosechas, los niveles de uso de agua, crecimiento y nutrición en las cosechas. Existen actualmente técnicas comerciales que prometen mejorar la administración del clima para una producción mejor y de mayor calidad, mediante la reducción del impacto ambiental. Sin embargo el uso de sistemas de cómputo para control ambiental no es tan común. Su masificación dependerá del nivel de desarrollo de los programas de cómputo, incluyendo mejores herramientas para recolección de datos sobre cosechas en tiempo real y la inclusión de modelos más dinámicos (Szewczyk et al., 2004).

El monitoreo puede realizarse de dos formas diferentes: mediante sensado remoto y sensado directo. El sensado remoto se refiere a la cuantificación de los atributos de alguna planta, sin establecer contacto directa con ésta, sino usualmente capturando las medidas de radiación electromagnética en longitudes específicas de ondas reflejadas o emitidas por las plantas. Nuevas técnicas permiten usar herramientas de medición aérea o satelitales para detectar cambios en grandes extensiones de cultivo, esto causa que muchas de esas técnicas sean inapropiadas para la administración de los cultivos en invernaderos. Sin embargo muchos de estos principios pueden ser aplicados en el contexto del invernadero.

Entre los problemas más comunes que enfrenta el monitoreo remoto está: que el equipo es costoso y complicado de usar para gente no experta. A su vez los métodos de medición directa involucran tener contacto físico con las plantas, esta es la forma más tradicional de obtener la información. Para este caso en particular se necesita tener cuidado especial, en evitar que el equipo de supervisión influya en las medidas.

La idea del monitoreo es mejorar la precisión de la información obtenida, mediante el recolectado de esta, directamente de la cosecha misma. Aquí, el desafío es emplear los sensores más exactos, y de esta forma ganar una comprensión mejor de la función de la planta.

II.1.1. Redes inalámbricas de sensores en la agricultura

Las redes de sensores aplicadas a la agricultura, pueden jugar un papel muy importante, debido a que a través de ellas es posible controlar y monitorear los recursos agrícolas que se encuentren en el campo, y a la vez procesar la información que se transmita. Entre sus principales aplicaciones se encuentran (Langendoen et al., 2006):

- Supervisión y control ambiental (radiación, viento...)
- Invernaderos, mallas
- Aviso de heladas
- Predicción de plagas
- Supervisión y control de riego
- Seguimiento de calidad
- Agricultura de precisión

- Sensores, actuadores

Además cuando se implementa el uso de las redes inalámbricas de sensores es posible garantizar lo siguiente (David et al., 2001):

- Bajo costo de instalación y mantenimiento
- Superar obstáculos físicos
- No irrumpir en la actividad habitual
- Robustez ante inclemencias meteorológicas
- Distancia de esparcimiento entre nodos de 10 a 100 metros

Una vez que ya se han conocido las múltiples aplicaciones de las redes inalámbricas de sensores en la agricultura, es interesante conocer entonces cuales son las consideraciones necesarias para implementar el uso de un red de sensores en un campo de producción agrícola; la siguiente sección brinda un panorama general al respecto.

II.2. Iniciando el monitoreo de cultivos protegidos

Antes de instalar una red inalámbrica de sensores en el área de siembra de un cultivo es necesario realizar una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la red y el software de administración. La idea general es comprobar todas las funcionalidades disponibles de la red y así poder contrastar su comportamiento, con el que presente una vez realizada su instalación. Una vez realizadas esta pruebas es posible realizar de una forma más segura, la instalación de la red.

II.2.1. Instalación de una red inalámbrica de sensores

Durante el proceso de instalación el primer punto a considerar es la ubicación de los nodos de la red. Para dicha labor es necesario tomar en cuenta algunos datos específicos de la región y el área de siembra como son:

- **Dirección del viento.** Este aspecto es importante debido a que afecta directamente al radio de transmisión de cada uno de los nodos de la red
- **Inclinación del terreno.** Es importante cuando se utilizan sensores de humedad y temperatura del suelo debido a que si los sensores no son instalados en puntos estratégicos del terreno no se obtendrán lecturas que reflejen datos significativos
- **Espacios disponibles.** Es importante cuando no se cuenta con infraestructura física que apoye a los sensores y nodos de la red. Los espacios disponibles son puntos potenciales para la ubicación de los sensores, la selección de estos se establece en base a su utilización, como por ejemplo paso de maquinaria o trabajadores, etc.
- **Estructura física.** Este punto se toma en cuenta cuando se cuenta con alguna estructura como invernadero, malla sombra, etc. Para el caso de las estructuras físicas es necesario tomar en cuenta la ubicación de los sensores, para de esta forma evitar potenciales problemas como interferencias que pueden afectar la calidad de la señal.

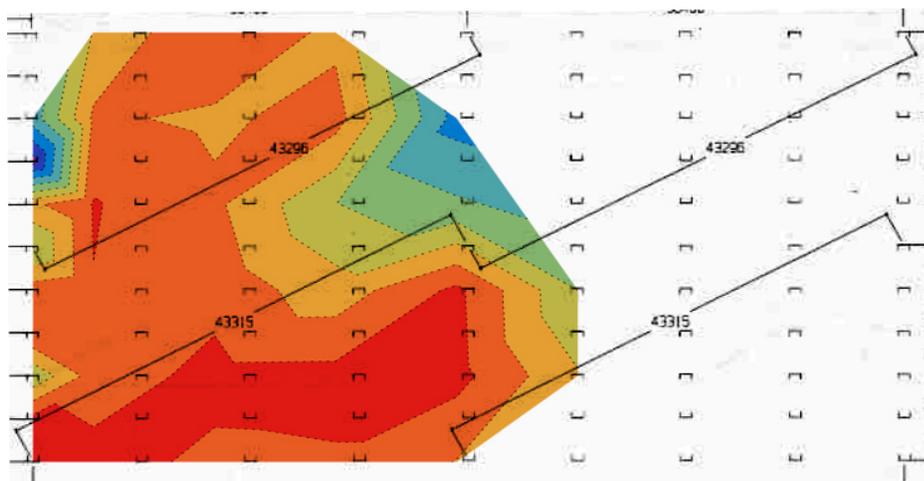


Figura 2: Gráfica que representa la calidad de la señal en un invernadero Ambar 960

Una vez que se ha tomado en cuenta todas las consideraciones iniciales es necesario realizar una prueba de la calidad de la señal inalámbrica de los nodos de red, tal como se

muestra en la Figura 2. Esta prueba permite conocer cual es el punto en el área de instalación donde mejor transmisión de datos tendrán los nodos, dichos resultados son de suma importancia cuando la estación base de la red se encuentra ubicada en un área alejada de los nodos.

Ya con los resultados de la calidad de la señal de los nodos de la red, los espacios y ubicación definidos, es posible realizar la instalación física de la red, la Figura 3 presenta la ubicación de los componentes físicos de la red, después de su instalación en unos invernaderos AZROM¹.



Figura 3: **Instalación de una red de sensores en un invernadero Ambar 960**

Una vez concluida la instalación de la red inalámbrica de sensores, el siguiente paso es iniciar con las labores de monitoreo, para ello es necesario apoyarse de las herramientas de *software* proveídas por el kit de sensores o alguna de desarrollo particular.

¹invernaderos AZROM. <http://www.greenhouse.co.il/spanish/>

II.2.2. Recopilando información de la red de sensores

La complejidad del proceso de recopilación de la información de la red de sensores varía dependiendo de la aplicación de *software* con la que se cuente. Existe una gran variedad de estas herramientas, sin embargo la mayoría coincide en que su fin es únicamente informativo. La Figura 4 presenta la captura de pantalla de una aplicación para visualizar los datos de una red inalámbrica de sensores basada en TinySOA (Avilés y García, 2007).

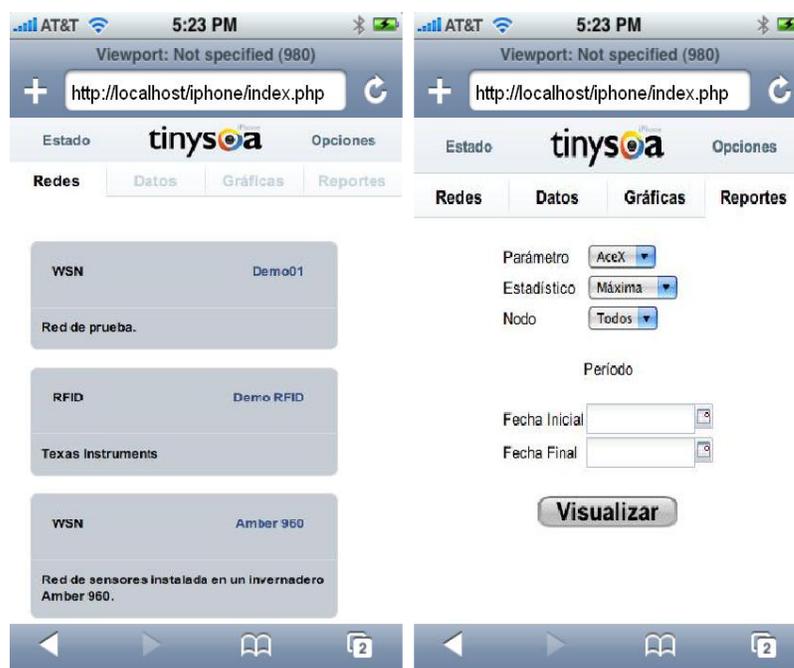


Figura 4: Captura de pantalla de un visor para WSN en dispositivos iPhone

Algunas aplicaciones para monitoreo proveen herramientas de graficación de los parámetros registrados por los sensores de la red. La Figura 5 presenta un registro de humedad ambiental reportado por un invernadero. Los registros de humedad pueden brindar una idea al encargado del cultivo sobre los niveles máximos y mínimos de agua que se presentan en las plantas. A su vez dicha información puede ser utilizada para planear los horarios y tiempo de aplicación del riego o servir como apoyo a la identificación de potenciales plagas y enfermedades que afecten al cultivo en particular.

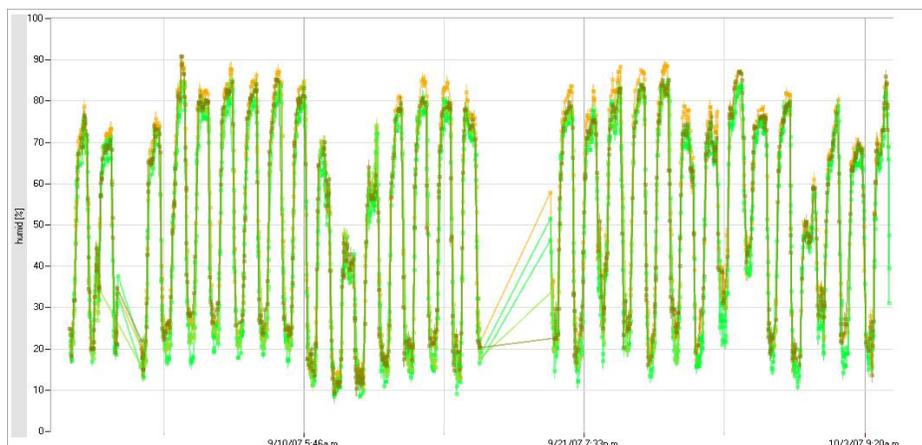


Figura 5: Gráfica que representa la humedad ambiental registrada por una WSN durante un periodo mensual

La Figura 6 muestra una representación de todos los componentes e interacciones de un sistema de monitoreo de cultivos para un invernadero. Una vez que se ha iniciado la recopilación de los datos de la red, el se presentan un gran número de usos que podría darse a la información registrada, es responsabilidad de la persona encargada del cultivo, la correcta utilización de dicha información.

II.3. Monitoreo del crecimiento de un cultivo

Actualmente con el apoyo de la tecnología es posible contar con suficiente información acerca de factores climáticos y biológicos involucrados en la duración del ciclo biológico y producción de los cultivos. Sin embargo el ciclo biológico cambia con el genotipo y los factores climáticos, esto quiere decir, que las plantas del mismo genotipo sembradas bajo diferentes condiciones climáticas pueden presentar diferentes estados de desarrollo después de transcurrido el mismo tiempo cronológico. Por lo que cada vez cobra mayor importancia el uso de escalas fenológicas que permiten a la vez, referirse a las observaciones y prácticas de manejo del cultivo en una etapa de desarrollo determinado.

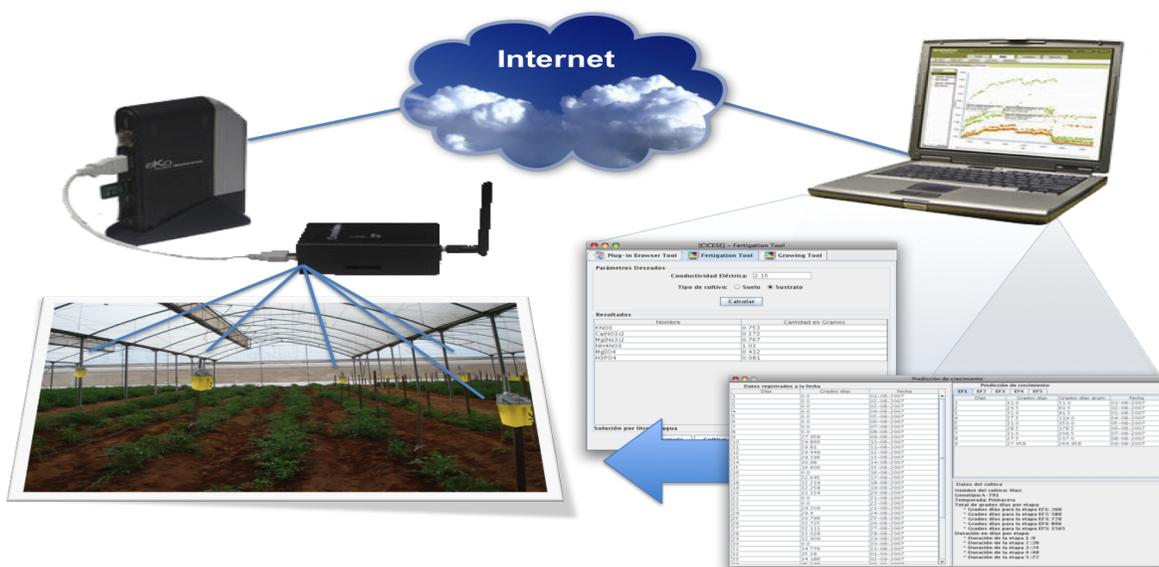


Figura 6: Sistema de monitoreo para cultivos protegidos

II.3.1. Fenología

Dado que el producto final de un cultivo, no es sino la consecuencia de un proceso derivado de las actividades agrícolas efectuadas durante todo el ciclo, para los investigadores y productores se hace necesario el conocimiento de la fenología agrícola y la posible duración de las diferentes etapas. El estudio de los eventos periódicos naturales involucrados en la vida de las plantas se denomina fenología ((Volpe, 1992); (Villalpando y Ruiz, 1993); (Schwartz, 1999)) palabra que deriva del griego phaino que significa manifestar, y logos tratado. Puede ser denominado también como el estudio de los fenómenos biológicos acomodados a cierto ritmo periódico como la brotación, la maduración de los frutos y otros (Fournier y Charpantier, 1978). Se definen entonces los siguientes términos:

- **Fase:** La aparición, transformación o desaparición rápida de los órganos vegetales se llama fase. La emergencia de plantas pequeñas, la brotación de la vid, la floración del manzano son verdaderas fases fenológicas (Torres, 1995)
- **Etapas:** Una etapa fenológica está delimitada por dos fases sucesivas. Dentro de ciertas etapas se presentan períodos críticos, que son el intervalo breve durante el cual

la planta presenta la máxima sensibilidad a determinado elemento, de manera que las oscilaciones en los valores de este fenómeno meteorológico se reflejan en el rendimiento del cultivo; estos periodos críticos se presentan generalmente poco antes o después de las fases, durante dos o tres semanas

El comienzo y fin de fases y etapas sirven como medio para juzgar la rapidez del desarrollo de las plantas (Torres, 1995).

II.3.2. Fenología en la agricultura

En el transcurso de la historia, el hombre ha utilizado su conocimiento sobre los eventos fenológicos en la agricultura. Es por eso que la fenología, la cual fue una parte integral de las antiguas prácticas agrícolas, aún mantiene una muy cercana relación con la agricultura moderna a través de sus valiosas contribuciones.

Los eventos comúnmente observados en cultivos agrícolas y hortícolas son: siembra, germinación, emergencia (inicio), floración (primera, completa y última) y cosecha. Los eventos adicionales observados en ciertos cultivos específicos incluyen: presencia de yema, aparición de hojas, maduración de frutos, caída de hojas para varios árboles frutales. El periodo entre dos distintas fases es llamado «estado fenológico» (Villalpando y Ruiz, 1993). La designación de eventos fenológicos significativos varía con el tipo de planta en observación.

Por ejemplo, teniendo en cuenta la acumulación de biomasa durante el desarrollo del tomate, se diferencian cinco etapas: crecimiento vegetativo, floración, fructificación, inicio de maduración y maduración (Lara, 1999).

Se debe considerar que un cultivo puede no desarrollar todas sus fases fenológicas (Aparición de nueva hoja, Floración, Inicio de desarrollo del fruto, Fin de desarrollo del fruto y Madurez del fruto), si crece en condiciones climatológicas diferentes a su región de

origen (Ruiz, 1991).

II.3.3. Unidades calor acumuladas

La temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos, que requieren de la acumulación de cierta cantidad de calor para pasar de un estado en su ciclo de vida a otro. La medida de este calor acumulado se conoce como tiempo fisiológico, y teóricamente este concepto que involucra la combinación adecuada de grados de temperatura y el tiempo cronológico, es siempre el mismo (W.M.O., 1993).

En términos generales, debajo de una temperatura umbral mínima, determinada genéticamente para cada organismo, el desarrollo no ocurre o es insignificante. Sobre dicha temperatura, el desarrollo se incrementa hasta llegar a un pico o intervalo, donde la velocidad del desarrollo es máxima. A partir de ahí, el desarrollo decrece nuevamente hasta llegar a ser nulo en una temperatura umbral máxima, estos valores se conocen como Temperaturas Cardinales (Ruiz, 1991). En algunos casos pueden ser utilizados segmentos de la curva de desarrollo para fines específicos, como la estimación de temperatura base, (véase Figura 7).

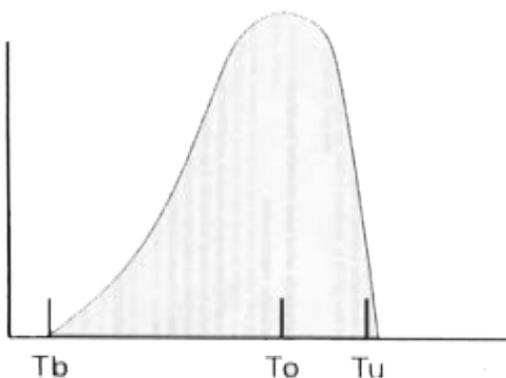


Figura 7: Curva de desarrollo de un cultivo

El crecimiento y desarrollo de las plantas e insectos puede ser caracterizado por el número de días entre eventos observables, tales como floración y madurez de frutos, etc.

El número de días entre eventos, sin embargo, puede constituir una mala herramienta porque las tasas de crecimiento varían con las temperaturas. La medición de eventos puede ser mejorada si se expresan las unidades de desarrollo en términos de tiempo fisiológico en lugar de tiempo cronológico, por ejemplo en términos de acumulación de temperatura. Es así como surge el término de grados-día, (véase Apéndice A), que puede ser definido como días en términos de grado sobre una temperatura umbral. De manera que para completarse una etapa fenológica es necesario la acumulación del requerimiento térmico, el cual se mide en grados-días sobre la temperatura base tal como se presenta en la Figura 8.

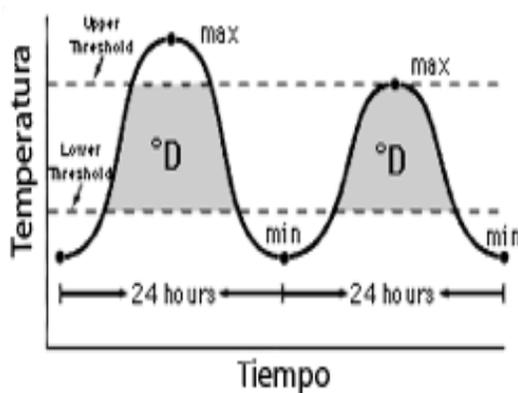


Figura 8: **Calculo del requerimiento térmico**

Los umbrales máximo y mínimo necesarios para el desarrollo de algunos organismos han sido determinados de manera cuidadosa con pruebas de laboratorio y experimentos en el campo. Por ejemplo para el caso del tomate se ha determinado² que:

- La temperatura óptima de desarrollo oscila entre 20 y 30 °C durante el día y entre 1 y 17 °C durante la noche; temperaturas superiores a los 30-35 °C afectan la fructificación, causan mal desarrollo de los óvulos y del sistema radicular.
- A temperaturas superiores a 25 °C e inferiores a 12 °C la fecundación es defectuosa o nula.

²Secretaría de Industria y Comercio de Honduras. <http://www.sic.gob.hn/portal/>

- La maduración del fruto está muy influida por la temperatura en lo referente tanto a la precocidad como a la coloración, de forma que valores cercanos a los 10 °C así como superiores a los 30 °C originan tonalidades amarillentas.

Los valores de temperatura descritos son meramente indicativos, es necesario tomar en cuenta las interacciones de la temperatura con el resto de los parámetros climáticos.

Muchas aplicaciones se sustentan en modelos de grados-días para describir el desarrollo de plantas e insectos. Algunos autores señalan que el éxito de los grados-días depende de una relación estrecha entre radiación y temperatura, fotoperíodo y temperatura y de cultivares adaptados a fotoperíodo locales (Hodges y Doraiswamy, 1979). En la mayoría de los modelos desarrollados para describir el desarrollo de cultivos y plagas donde se han considerado factores climáticos, los que presentan más aplicación se fundamentan en la temperatura o la interacción de esta con el fotoperíodo y se basan en relaciones no lineales con posibilidad de transformación lineal (Ruiz, 1991).

II.4. Fertirrigación en cultivos

Es posible definir fertirrigación como la aplicación de soluciones nutritivas (véase Apéndice B), a un cultivo necesarias para el crecimiento de las plantas. Para su aplicación es necesario tomar en cuenta la cantidad, la proporción y forma química requerida por las plantas según su etapa fenológica, el ritmo de crecimiento y acumulación de materia seca, todo esto con el objetivo de lograr a corto largo plazo altos rendimientos en la producción y aumentando en la calidad del cultivo (Navarro, 1997).

II.4.1. Nutrición de cultivos

La nutrición de un cultivo consiste en el manejo de todos aquellos elementos minerales, orgánicos y agua, requeridos por los cultivos, de tal forma que sean proporcionados

conforme a las necesidades fisiológicas de la planta según: su etapa fenológica, la composición química del cultivo, la cantidad, la calidad y el periodo de aplicación (Navarro, 2000).

El principio básico de la nutrición de cultivos es el monitoreo de los elementos minerales en el agua, suelo y plantas. Para esto es necesario utilizar una serie de análisis y técnicas de nutrición tales como: análisis de suelo, análisis de agua, análisis de la solución del suelo entre los más importantes. Se parte del establecimiento de estándares y concentraciones óptimas para cada tipo de análisis, cultivo y etapa fenológica en donde se requiere la ayuda de equipo especializado con el cuál se calibra e interpreta conjuntamente los diferentes tipos de análisis. Los propósitos básicos del análisis de cultivos son la predicción de futuros problemas nutrimentales, el monitoreo para conocer la dinámica nutrimental y el diagnóstico para evaluar las posibles causas de un desarrollo fisiológico restringido por alguna deficiencia, exceso o problema del orden nutrimental.

Inicialmente se realizan como prerrequisito básico un análisis completo de suelo el cuál incluya fertilidad, salinidad y un análisis químico y físico del agua de riego, en base a estos análisis se realiza el programa de fertirrigación y se toma la decisión de realizar una fertilización de fondo, si es que el nivel de fertilidad inicial no es el adecuado de acuerdo a los requerimientos del cultivo. El programa de fertirriego debe ser realizado previo conocimiento de la extracción media de nutrimentos por tonelada, duración de etapas fenológicas y acumulación de materia seca, y este solo servirá de base para que durante el transcurso del cultivo se realicen los ajustes correspondientes según la respuesta del cultivo a la aplicación de cierto ritmo de fertilización y al acercamiento que esta fertilización tenga con los estándares óptimos de concentración (Tijerina, 1999).

Si el ritmo planeado de fertilización se encuentra cercano a una concentración óptima, se mantiene el mismo ritmo de aplicación. Si el ritmo de aplicación de fertilizantes se encuentra por debajo de la concentración óptima, se incrementa el ritmo de aplicación o se

busca la posibilidad de algún bloqueo de elementos. Si el ritmo actual de fertilización se encuentra según resultados de los análisis correspondientes, por encima del nivel óptimo entonces se reduce el ritmo de aplicación o se suspende la fertilización según el criterio agronómico del técnico evaluador.

Es importante mencionar que las antiguas fórmulas de fertilización «NPK» generalizadas para todas las condiciones de un cultivo, actualmente ya no se utilizan en cultivos de alto rendimiento. Ahora con la existencia del análisis como técnica de diagnóstico y debido a la gran demanda de información técnica referente a la nutrición de cultivos hortícolas, se puede suministrar al cultivo los nutrimentos minerales adecuados, en base a los resultados de los análisis. Estos permiten el uso del contenido mineral de las plantas como indicador de su estado nutrimental y fisiológico, aspecto que está directamente relacionado con la obtención de altos rendimientos y buena calidad en las cosechas.

II.4.2. Relaciones Agua, Suelo y Planta

Las relaciones entre el agua, suelo y plantas son de particular importancia en la agricultura, ya que forman parte indispensable de los fundamentos técnicos que los agrónomos especialistas en nutrición deben manejar; entre las relaciones más importantes se encuentran:

- La capacidad del suelo para retener agua y permanecer bien drenado.
- Las características del flujo del agua en los suelos.
- Las propiedades físicas del suelo incluyendo el contenido de materia orgánica, profundidad del suelo, textura del suelo y estructura del suelo.
- Las propiedades químicas del suelo incluyendo la concentración de sales solubles y nutrimentos debido al movimiento, uso y evaporación del agua localizada en el suelo.

El conocimiento de todas estas relaciones y como ellas están relacionadas entre sí es de gran importancia para todos aquellos que deseen mejorar las actividades de la fertirrigación y obtener el mejor y más eficiente uso del agua y fertilizantes. En las siguientes secciones se realiza una descripción de cada uno de los análisis recomendados para el monitoreo de cultivos.

II.4.3. Análisis de agua de riego

Una vez conocidas las características del agua de riego, es posible adecuar su pH, neutralizando bicarbonatos, dosificando los fertilizantes de acuerdo con sus contenidos y considerando los elementos en exceso para reducir su efecto negativo, todo ello modificando adecuadamente los niveles de algunos nutrimentos. Además puede preverse la incidencia de su composición en la permeabilidad del suelo, todo esto en función de parámetros como su textura y capacidad de fijación de sodio. El contenido de sales presentes en el agua de riego utilizadas en los sistemas de riego pueden presentar problemas de precipitaciones y taponamiento de goteros (riego por goteo) si el tratamiento previo a éstas no es el correcto.

Además de esto, es importante conocer el contenido mineral del agua, pues en ciertos casos las aportaciones de elementos pueden ser un complemento en el programa de fertirrigación como son NO_3 , Ca, Mg y en otros casos elementos como Boro, Cloro y Sodio pueden dar lugar a problemas de toxicidad.

El nivel de salinidad y la conformación de los diferentes elementos del agua, es un criterio esencial en la selección del sistema de riego, ya que con aguas de alta salinidad algunos sistemas de riego no son recomendables (véase Sección C.1). La determinación de las necesidades de lavado adicional en aguas salinas, es muy importante para evitar problemas al incrementarse el potencial de solutos fuera de los límites fisiológicos que la planta permite. Otro aspecto importante es el conocimiento de la presencia de partículas sólidas

como son: arenas, algas, materia orgánica entre otros, para determinar la capacidad y tipo de filtrado que ha de requerir el sistema como medida para evitar futuras obturaciones, por lo que además del análisis químico se deberá realizar un análisis físico cuando menos al momento de establecer un sistema de riego por goteo (Ayers y Wescott, 1994).

II.4.4. Análisis de suelo

Para comprender la productividad del suelo, se debé reconocer las relaciones suelo-planta existentes. Algunos de los factores externos que controlan el crecimiento de las plantas son: aire, temperatura, luz, nutrimentos y agua. La planta depende del suelo en forma total o parcial para el suministro de estos factores, con excepción de la luz. Cada uno de ellos afecta en forma directa el crecimiento de la planta, por lo que existe una relación entre cada uno de ellos (Ayers y Wescott, 1994).

La fertilidad del suelo es vital para un suelo productivo. Un suelo fértil no tiene necesariamente que ser un suelo productivo. Un drenaje insuficiente, insectos, plagas, sequía y otros factores pueden limitar su producción, aún teniendo una fertilidad adecuada. Para comprender mejor la fertilidad del suelo, debemos en primer lugar conocer los otros factores que favorecen o limitan la productividad.

Los análisis de suelo son una de las mejores herramientas con las que cuenta el agrónomo para analizar los cultivos. Los análisis de suelo son el primer tipo de análisis que debe realizarse antes de comenzar la campaña de fertirrigación. La interpretación de los resultados es de especial interés, debido a que es necesario ajustar los resultados en base a las características de la línea de producción por establecer, como son: tipo de suelo, extracción media de nutrimentos por el cultivo y el tipo de cultivo (véase Sección C.2).

Los análisis de suelo nos permiten realizar las aportaciones previas para hacer más eficaz la fertirrigación, determinar la fertilización de fondo que normalice los índices de fertilidad del suelo, y conocer los niveles de reserva, fundamentalmente fósforo y potasio. Los valores encontrados en los análisis de suelo nos indican lo que potencialmente el suelo le puede aportar al cultivo, dado que para poder iniciar un buen programa de fertirrigación es necesario contar con un nivel de fertilidad mínimo aceptable en el suelo, esto según los requerimientos del cultivo (Cadahía, 1998).

II.4.5. Análisis de fertilizante

El análisis de la solución de fertilizantes se realiza en base a las muestras recogidas de los goteros en la cinta de riego durante la fertilización, para comprobar que todos los procesos de disolución, dilución y adecuación de pH y conductividad eléctrica se han hecho correctamente.

La solución nutritiva es la disolución en agua de los nutrientes necesarios para la alimentación de la planta, que deben estar en forma asimilable, en concentración y en proporción adecuada. Esta solución deberá contener los nutrientes disponibles para el cultivo, considerando que un mismo elemento mineral puede presentar diversas formas químicas de las cuáles solo alguna o algunas pueden ser absorbidas eficientemente por la planta (Steiner, 1984). En general la forma asimilable de un nutriente será la que se encuentre soluble en agua de forma natural en un suelo fértil.

II.5. Conclusión

El cálculo de los grados-días viene a presentar una solución importante en la estimación del crecimiento de un cultivo ya que presenta características que pueden ser adaptadas dependiendo del tipo de cultivo, región y estación del año. La importancia de estimar el tiempo de crecimiento de un cultivo radica en la amplia gama de posibilidades que ofrece a los administradores de cultivos al momento de tomar una decisión respecto al manejo

de las plantas.

Los principales errores en el balanceo de los nutrientes y fertirrigación en general son originados por malas técnicas de muestreo, una mala preparación, errores en el análisis del material recolectado, falta de criterio agronómico de la persona encargada del muestreo. Por esta razón el balanceo de los nutrientes viene a constituir una de las partes más importantes y quizás el punto débil del análisis nutrimental (Jackson, 1976), por lo que es necesario desarrollar mecanismos que apoyen a esta labor.

Los diferentes análisis descritos hasta ahora trabajan de forma complementaria en el proceso de nutrición de los cultivos. La sección de los análisis adecuado va depender de la superficie establecida, el tipo de cultivo y la disponibilidad del equipo de muestreo. Dado su bajo costo y la gran aporte en el proceso de toma de decisiones los análisis en los cultivos son considerados altamente rentables y de gran productividad, sobre todo en cultivos de alto rendimiento en donde se llevan a cabo fuertes programas de fertirrigación, con fertilizantes caros y de alta calidad. El especialista en fertirrigación y nutrición deberá seleccionar el tipo de análisis necesario, por lo que no significa que se deban utilizar todos los análisis en todos los cultivos.

Este trabajo aborda el uso de los grados-días como técnica para la estimación del crecimiento de un cultivo, por otra parte utiliza los conceptos de fertirrigación expuestos a lo largo de este capítulo para estimar las necesidades nutrimentales de los cultivos, todo esto con el apoyo de las redes inalámbricas de sensores. El diseño e implementación de la plataforma que brinde soporte a las funcionalidades mencionadas anteriormente se presenta en los capítulos siguientes.

Arquitectura para Monitoreo de Cultivos

«Las cosas deberían hacerse del modo más sencillo posible, pero no más simples»

– Albert Einstein (1879-1955)

Una arquitectura es la organización fundamental de un sistema descrita en termino de sus componentes, la relación entre ellos con el ambiente y los principios que guían su diseño y evolución. Se define como arquitectura de software al nivel de diseño que se enfoque en aspectos más allá de los algoritmos y estructuras de datos; como son el diseño y especificación de la estructura global del sistema de software, el primer paso en la producción de un diseño de software, en una secuencia que distingue tres pasos (Garlan y Shaw, 1993):

- **Arquitectura.** Asocia las capacidades del sistema especificadas en el requerimiento con los componentes del sistema que habrán de implementarla. La descripción arquitectónica incluye componentes y conectores (en términos de estilos) y la definición de operadores que crean sistemas a partir de subsistemas o, en otros términos, componen estilos complejos a partir de estilos simples.
- **Diseño del código.** Comprende algoritmos y estructuras de datos; los componentes son aquí primitivas del lenguaje de programación, tales como números, caracteres, punteros e hilos de control. También hay operadores primitivos.

- **Diseño ejecutable.** Remite al diseño de código a un nivel de detalle todavía más bajo y trata cuestiones tales como la asignación de memoria, los formatos de datos, entre otros.

Este trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de una arquitectura para realizar monitoreo de cultivos protegidos mediante el uso de las redes inalámbricas de sensores, permitiendo la extensibilidad de funcionalidades y el soporte dinámico a diferentes tipos de redes de sensores.

Hasta la fecha, la mayoría de las investigaciones en el área de redes inalámbricas de sensores WSN se ha centrado en las capas de más bajo nivel. Los trabajos más importantes se han centrado en atacar problemas como la agregación de datos, los algoritmos de enrutamiento, el uso eficiente de energía, la reprogramación y la transmisión segura de datos. Sin embargo problemas como el desarrollo de aplicaciones para usuarios finales son aspectos que no han recibido suficiente atención (Tavakoli et al., 2007).

En este capítulo se presentan los requerimientos de una arquitectura para monitoreo de cultivos protegidos que utilicen redes inalámbricas de sensores, detallando los componentes que la conforman.

III.1. Requerimientos de la arquitectura

El capítulo II presenta las características necesarias para un sistema de monitoreo en cultivos protegidos. Dichas características vienen entonces a formar la base de una serie de requerimientos para el diseño de una arquitectura de monitoreo de cultivos. A continuación se presentan una serie de requerimientos que han sido identificados como necesarios para diseñar un sistema de monitoreo de cultivos que utilice redes de sensores.

Cuando se decide utilizar un sistema de monitoreo de cultivos, basado en redes inalámbricas de sensores, la primera decisión que hay que tomar es que tipo de kit de sensores utilizar. Existen algunas opciones en el mercado, tanto kits especializados en monitoreo agrícola como algunos de propósito general. Lo que tienen en común la mayoría de estos productos es que existe una dependencia entre el *software* proporcionado y el *hardware*. Debido a esta dependencia se vuelve imposible brindar soporte a nuevo hardware, así como extender las funcionalidades de la herramienta de *software*.

Una de las problemáticas del monitoreo de cultivos, es la constante variación de las necesidades de las plantas, ya que sus necesidades difieren en cada una de sus etapas fenológicas. Es por eso que se necesitan arquitecturas de monitoreo que brinden extensibilidad de sus funcionalidades y de esta forma estar preparados a las exigentes demandas que tiene el sector agrícola.

Con la gran variedad de plataformas de software disponibles, actualmente es necesario contar con arquitecturas que brinden soporte a la mayoría de éstas o las más importantes. Una arquitectura que pueda ser implementada en múltiples plataformas, de tal forma que se logre un mayor impacto en el número de usuarios potenciales del sistema.

Con la información expuesta anteriormente, se identificó que una arquitectura para el desarrollo de sistemas de monitoreo debe:

- Permitir el acceso a una o varias redes inalámbricas de sensores para monitoreo
- Permitir la integración de nuevo hardware para monitoreo
- Permitir la integración de nuevas funcionalidades de software
- Eliminar la dependencia de la plataforma de implementación

Otro punto importante que debe permitir la arquitectura es el crecimiento a gran escala de la redes de monitoreo incorporadas. Actualmente la mayoría de las redes inalámbricas

de sensores disponibles en el mercado dan soporte a un crecimiento a pequeña escala; mucho de esto se debe a la dificultad de integrar diferentes sistemas que utilicen WSN y otros sistemas ya establecidos.

Vale la pena mencionar otra característica a la que una arquitectura de monitoreo debe estar preparada. Dicha característica se refiere a los inevitables cambios que trae consigo la evolución de los sistemas; la era actual es de constantes modificaciones, debido a la gran cantidad de información que se genera como resultado de las muchas investigaciones existentes en el área de redes inalámbricas de sensores. Si una arquitectura no está preparada para el cambio eventualmente se volverá incompatible con otras, lo cual inevitablemente causará que sea desechada.

III.2. Trabajo previo

En esta sección se presentan algunos trabajos de investigación realizados con enfoque en el monitoreo de cultivos, cada uno de ellos aborda algunos de los diferentes problemas expuestos en el Capítulo II. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

III.2.1. eKo Pro Series

El kit de desarrollo eKo PRO Series para monitoreo de cultivos, consiste de un grupo de nodos eKo eN2100. Los cuales utilizan un protocolo ad-hoc multisalto llamado XMesh desarrollado por Crossbow. Las características físicas de la red WSN que forman con los nodos eKo son las mismas que una red WSN tradicional. Sin embargo, los nodos eKo son diseñados para monitoreo a cielo abierto.

Estos nodos contienen 4 puertos en la parte inferior, dedicados a conectar 4 sensores compatibles. Los sensores se conectan al nodo y al reiniciar, este identifica los nuevos sensores instalados. El kit eKo PRO Series viene con sensores de humedad y temperatura para

tierra y aire. Para la comunicación utiliza una estación base, responsable de comunicar a sistemas exteriores con la red WSN formada por los nodos. La estación base ejecuta el sistema operativo Debian GNU/Linux4 y ofrece una interfaz via Web para la consulta de los datos.

La comunicación con estos nodos se hace a través de la estación base, utilizando el protocolo Secure Shell (SSH), el cual provee una conexión segura a través de redes inseguras (como Internet) gracias al uso de encriptación (Crossbow, 2008).

Entre las desventajas encontradas en este kit de sensores se encuentran la dependencia con la plataforma «.Net de Microsoft», lo cual imposibilita utilizar otro tipo de nodos con el software proporcionado. Además no se proveen mecanismos para desarrollar servicios adicionales que complementen los ya ofrecidos con el kit.

III.2.2. Monitoreo automatizado de las hortalizas de invernadero

Un equipo de investigadores del Pacific Agri-food Research Centre (PARC) en Agassiz, desarrolló un sistema para monitorear la tasa de crecimiento de un cultivo de tomate en invernadero, utilizando celdas de carga (Ehret et al., 2003). El objetivo de este trabajo es determinar el tiempo de crecimiento de un cultivo en base a su peso, con este mismo principio calcula además cuales son las necesidades hídricas de la planta. El principio utilizado es sembrar un cultivo sobre una superficie que está siendo pesada constantemente. De esta forma es posible determinar el volumen de agua que se le está aplicando a la planta y controlar su flujo, además se mide la cantidad de peso en la que varía la planta día a día y posteriormente se determina la tasa de crecimiento en base al aumento de peso.

Entre las ventajas identificadas se encuentra la gran cantidad y costo del equipo necesario para registrar los cambios de peso, existe dependencia con la plataforma de implementación y el hardware utilizado. Por último es importante mencionar que el

sistema de software presentado solamente presenta los valores registrados por los sensores, de tal forma que cualquier inferencia que quisiera realizarse al respecto de los datos, tendrá que hacerse en forma manual por el usuario.

III.2.3. Una red inalámbrica de sensores prototipo para monitoreo ambiental en invernaderos

Este trabajo presenta un prototipo que utiliza redes inalámbricas de sensores para medir temperatura, humedad y luminosidad en un invernadero (Liu et al., 2007). El objetivo de este trabajo es el monitoreo de variables climáticas de un invernadero a través de una red inalámbrica de sensores, para dicha labor diseñaron un dispositivo llamado «Sink Node», el cual provee comunicación entre una estación base y la red de sensores a través de la red GSM.

El enfoque del trabajo es proveer comunicación entre la red de sensores ubicada en un área sin conexión a internet y un sitio remoto. Adicionalmente proveen una herramienta de software que visualiza y gráfica los datos registrados por la red de sensores.

Entre sus principales limitaciones se encuentra el uso de la red GSM, que si es cierto que permite la transmisión sin la necesidad de contar con internet, tiene la limitante del ancho de banda. Debido a que se utiliza una red que no está diseñada para transmitir grandes volúmenes de información, por lo que es poco aplicable en su uso comercial. Otras limitaciones encontradas son que no realiza ningún tipo de inferencia con los datos que recopila la red, por lo que su uso es únicamente informativo. Por último se debe mencionar que el diseño del nodo sink limita el tipo de nodos que pueden ser utilizados dentro de la red.

III.2.4. CIAT

Estudiantes de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle (Cali Colombia) y Tesisistas del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT, desarrollaron un sistema para

monitoreo del microclima en invernaderos del CIAT, se mide la temperatura, humedad relativa, y luminosidad para toda el área del invernadero o cuarto de crecimiento, y la ventilación para tres puntos dentro del mismo (Castrillón y Perlaza, 2007).

Dicho sistema está compuesto por una red de sensores de humedad relativa, temperatura y luminosidad, ubicados en puntos estratégicos dentro del invernadero y tres sensores de velocidad de viento ubicados longitudinalmente a lo largo de la instalación en tres puntos. Este sistema puede adaptarse a cualquier instalación. Realiza una revisión de datos almacenados previamente a través de animaciones y consulta histórica puntual. Este sistema se presenta entonces como una herramienta para el monitoreo y diseño de ensayos en invernaderos y cuartos de crecimiento para el diseño y rediseño de estas instalaciones.

Entre sus desventajas se encuentra que: su arquitectura no es extensible, existe dependencia entre el *hardware* utilizado y el *software* desarrollado, así como la dependencia del sistema operativo.

III.2.5. SIPPEM

El objetivo es emitir predicciones y alertas de los niveles de población de una plaga y a su vez realizar diagnósticos sobre enfermedades en las condiciones reales de la parcela (clima, suelo, etc.) (Ochoa et al., 2007). El SIPPEM utiliza datos proporcionados por una estación meteorológica para realizar sus predicciones. Para realizar las predicciones se toman los datos climáticas que han sido sensados y se comparan con un conjunto de reglas previamente predefinidas para luego determinar si un cultivo es propenso a contagiarse de una plaga o adquirir una enfermedad.

Entre sus desventajas se encuentran el hecho de que no es posible extrapolarlo a otra región para su uso debido a que las reglas para predicción que maneja son específicas para la región donde fue diseñado. Además, no provee mecanismos para extensibilidad de sus

funciones, así como independencia de la plataforma de desarrollo.

III.3. Diseño de una arquitectura para monitoreo con WSN

Una vez que los requerimientos de la arquitectura han sido planteados (véase Sección III.1) y se ha realizado un estudio sobre trabajos previos, se propone una arquitectura que brinde soporte a los requerimientos planteados y que ayude al cumplimiento de los objetivos que guían este trabajo. La Figura 9 presenta la arquitectura propuesta.

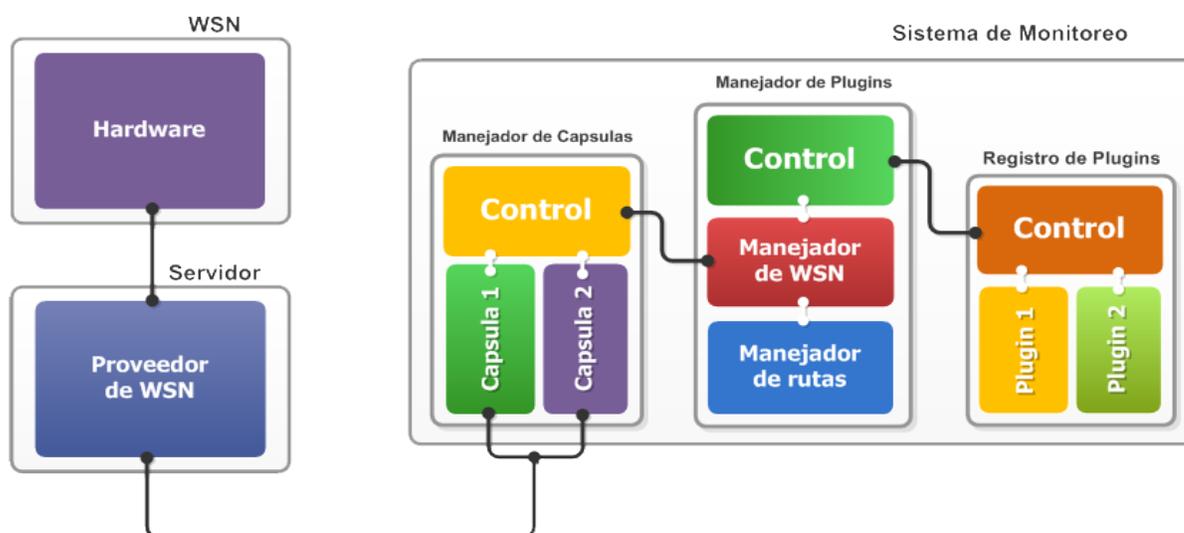


Figura 9: Arquitectura para monitoreo de cultivos

Una vez presentada la arquitectura que guiará este trabajo, se procede a detallar los elementos principales que la conforman. Como es posible observar en la figura anterior, el sistema de monitoreo está conformado por 3 componentes principales:

- **Sistema de Monitoreo.** Se refiere a la arquitectura para una aplicación de monitoreo. Está conformado por un administrador central, que se comunica con el «Manejador de WSN» encargado de la comunicación con las WSN y con el «Manejador de Rutas» encargado de gestionar la ruta de cada uno de los componentes del sistema.
- **Servidor.** Es el encargado de gestionar la información entre la aplicación «Sistema de

Monitoreo» y los componentes de la red de sensores, proveyendo acceso a todos los servicios disponibles de la red.

- **WSN.** Se refiere a los componentes físicos de la red de sensores como son nodos, sensores, *gateway*, entre otros. Todos estos dispositivos en conjunto se encargan de transmitir los parámetros sensados al «Servidor».

III.3.1. Manejador de Plugins

Se refiere al módulo central de la arquitectura. A través de él se realiza la administración de los plugins disponibles, la cual va desde la validación de su diseño hasta la publicación de los servicios que ofrece. Está conformado por un manejador de WSN y un manejador de rutas. Su principal función es activar la carga de los plugins y gestionar sus peticiones entre sus dependencias. De forma adicional tiene la capacidad de desactivar plugins en tiempo de ejecución, sin que sean borrados del registro.

El manejador de WSN es el encargado del manejo de la cada una de las redes de sensores disponibles, se encarga de gestionar las entradas y las salidas requeridas por los servicios de la red.

El manejador de rutas por su parte se encarga de registrar las ubicaciones físicas de cada plugin, librerías y archivos utilizadas por el sistema.

III.3.2. Registro de Plugins

Gestiona toda la meta-información acerca del descubrimiento de plugins. Proporciona un registro de los plugins descubiertos en base a un conjunto de meta-datos requeridos en el diseño de los plugins.

En un contexto de desarrollo de aplicaciones para que un plug-in sea disponible al sistema deberá registrar sus meta-datos al registro de plugins. De forma adicional debe proveer métodos para eliminar plugins del registro de meta-datos. Todos estos métodos debe ser proveídos en tiempo de ejecución.

III.3.3. Manejador de Cápsulas

El manejador tiene una función similar al manejador de plugins pero con las redes a las que se le pretende brindar soporte. Cuando el manejador de plugins inicia, se registran las redes con las que interactúa cada plugin, de tal forma que el manejador de cápsulas verificará la existencia de éstas y proporcionará métodos para que el plugin accese a los servicios proveídos por la red.

El manejador de cápsulas proveerá al programador una manera fácil y rápida de brindar soporte a nuevas redes de sensores, sin que este conozca los detalles del proveedor de la información.

III.4. Conclusión

En las secciones anteriores de éste capítulo se revisaron los requerimientos para el diseño de una arquitectura para monitoreo de cultivos mediante el uso de redes inalámbricas de sensores. La arquitectura que se propone se enfoca en la extensibilidad de sus funciones, el uso de información de múltiples orígenes (redes de sensores) y la posibilidad de brindar soporte a nuevo hardware. Podemos identificar entonces estos aspectos como los principales requerimientos de los sistemas para monitoreo de cultivos con WSN.

La extensibilidad de las funcionalidades de la arquitectura es posible gracias al diseño modular con el que fue creada, de tal forma que para agregar nueva funcionalidad basta con diseñar un nuevo plugin que implemente el comportamiento deseado. Para brindar soporte al uso de múltiples orígenes se propuso una capa de administración de datos, la

cual además permite brindar soporte a nuevo hardware. La Figura 10 presenta el escenario de aplicación de un sistema de monitoreo de cultivos basado en las características de la arquitectura propuesta.

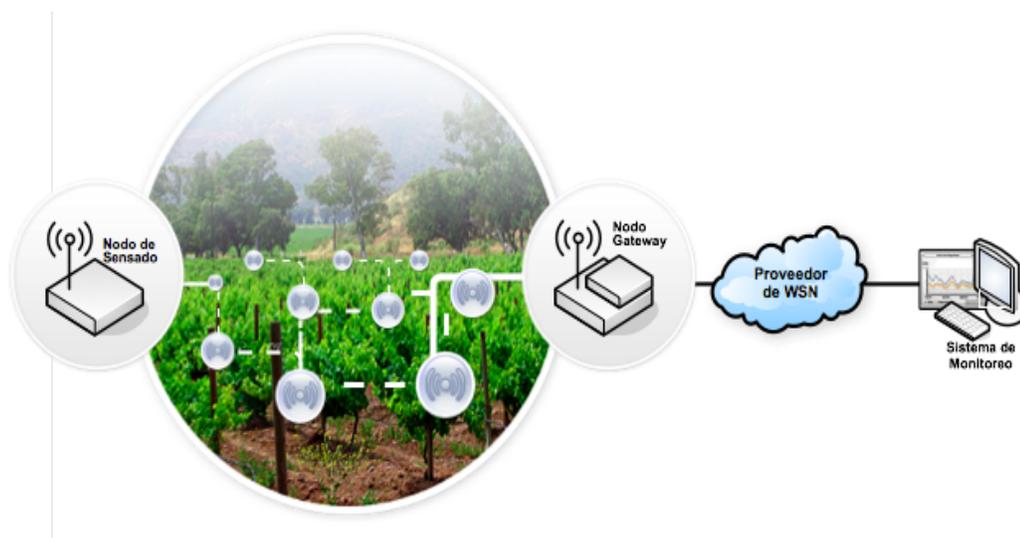


Figura 10: Escenario de aplicación de un sistema para monitoreo de cultivos con WSN

En el siguiente capítulo se detalla la implementación de un sistema prototipo para monitoreo de cultivos utilizando la arquitectura descrita a largo del presente capítulo.

Diseño e Implementación de un Prototipo

*«Las ciencias aplicadas no existen,
sólo las aplicaciones de la ciencia»*

– Louis Pasteur (1822-1895)

En este capítulo se describen los elementos que forman parte del diseño e implementación de un sistema prototipo, además se presenta una descripción de las tecnologías utilizadas, así como las diferentes pantallas de las que está compuesta la interfaz de usuario.

El objetivo principal de la implementación del sistema prototipo es que los usuarios finales pudieran tener una interacción con la interfaz de computadora, de manera que pudieran utilizar la información proporcionada por el sistema, de apoyo al proceso de toma de decisiones que realizan durante sus actividades profesionales. La idea principal es que la utilización de la tecnología desarrollada disminuya el tiempo de realización de sus actividades y proporcione información precisa para el correcto desempeño de su trabajo. Por dicha razón, la implementación del sistema a nivel de interfaz de usuario fue reducida al máximo, esto significa que la mayor parte de las funcionalidades del sistema se realizan de manera interna y de forma automática sin intervención del usuario.

IV.1. Plataforma de *hardware*

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se contó con dos diferentes kits de redes inalámbricas de sensores. A continuación se presentan las características principales de cada uno de ellos.

IV.1.1. WSN Professional Kit

El objetivo del kit profesional WSN es la recopilación de diversos parámetros climáticos en ambientes cerrados, las partes que conforman el kit son:

- Seis motes MICAz con radio de 868/916 MHz a 2.4 GHz y comunicación inalámbrica
- Siete placas MTS400 con sensores de temperatura, humedad, presión barométrica aceleración y luz ambiental.
- Dos placas *gateway* MIB520

En este kit, los nodos se comunican con el *gateway* vía inalámbrica, mediante el protocolo xmesh. Un vez que el *gateway* recibe los datos, junto con el kit se proporciona una aplicación que se encarga de almacenar los datos recibidos y proporcionar una interfaz gráfica para consulta de la información.

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó el *middleware* TinySOA (Avilés, 2006), el cual proporciona un grupo de servicios Web para hacer las consultas a los nodos. TinySOA incluye un componente pasarela el cual se encarga de la comunicación por medio del protocolo TCP/IP, gracias al programa serialforwarder que se incluye como parte de la distribución de TinyOS.

IV.1.2. eKo PRO Series

El kit de desarrollo eKo PRO Series está diseñado para la obtención de parámetros ambientales tanto en cielo abierto como en suelo, entre sus componentes se encuentran:

- Tres nodos eKo eN2100
- Un dispositivo eS1201 con sensores de temperatura ambiental y humedad
- Una eKo Base-Radio eB2110
- Seis sensores de humedad del suelo eS1101
- Una placa *gateway* eG2100

Cada uno de los nodos eKo contiene 4 puertos en la parte inferior, los cuales están dedicados a conectar 4 sensores compatibles. Los sensores se conectan al nodo y al reiniciar, este inicia un proceso de identificación para los nuevos sensores instalados. Los datos que son obtenidos por los sensores, son transmitidos a una estación base, la cual a su vez se comunica directamente con un *gateway*, encargado de almacenar la información. El *gateway* ejecuta el sistema operativo Debian GNU/Linux4 y ofrece una interfaz para la consulta de los datos mediante el protocolo Secure Shell (SSH) (Crossbow, 2008).

En la figura 11 se presentan en la parte izquierda, un nodo para exterior con comunicación inalámbrica, y una celda solar como fuente de energía y en la parte derecha un sensor para humedad y temperatura del suelo, ambos pertenecientes al kit eKo PRO Series. Todos los kits de redes de sensores que son mencionados anteriormente son productos de la compañía Crossbow¹.



Figura 11: **Nodo y sensor de kit eKo PRO Series (Crossbow, 2008)**

¹Crossbow Technology, Inc. <http://www.xbow.com/>

IV.2. Implementación

Una vez realizada la descripción del hardware utilizado para la realización de este trabajo de investigación, se presentan en esta sección los detalles del diseño e implementación del sistema prototipo, el cual está basado en la arquitectura presentada en el capítulo anterior.

El desarrollo del sistema se realizó en el lenguaje Java, utilizando el *framework* JPF², debido a que es el lenguaje de programación de mayor dominio por parte del autor, así como la compatibilidad con ciertos módulos de software utilizados para el desarrollo de este prototipo. JPF provee una infraestructura con gran capacidad de modularidad y extensibilidad, mediante sus utilización es posible descubrir y cargar de manera dinámica nuevos módulos disponibles. Dichos módulos son conocidos como plugins. Existen otros componentes de software adicionales utilizados en el desarrollo de este trabajo, entre los cuales se encuentran los *middlewares* TinySOA y ActiveCloud (Olea, 2008), los cuales proveen la comunicación con los componentes de *hardware* y el sistema desarrollado.

La manera en que opera el sistema prototipo es la siguiente: inicialmente cuando el sistema se inicia por primera vez se realiza una verificación de todos los plugins existentes, e irá registrando todos los que sean verificados como válidos, adicionalmente los plugins válidos, estarán disponibles en la interfaz gráfica del sistema, como una pestaña más del componente JTabbedPane³. Un plugin válido es aquel que ha sido diseñado en base a la estructura especificada en la documentación del JPF. Por otra parte una vez que el sistema ha verificado los plugins disponibles, se realiza una verificación de las cápsulas declaradas en el archivo de configuración del sistema, para posteriormente ponerlas disponibles a su plugin correspondiente.

²Java Plugin Framework. <http://jpf.sourceforge.net/>

³Java 2 Platform SE v1.4.2. <http://java.sun.com/j2se/1.4.2/docs/api/javaw/swing/JTabbedPane.html>

IV.2.1. Sistema de monitoreo para cultivos protegidos

En la Figura 12 se muestra el diagrama global de emplazamiento y de componentes del sistema. Como es posible observar, al existir un componente manejador de WSN es necesario que el sistema desarrollado pueda interactuar con varios tipos de redes inalámbricas de sensores, para lo cual fue necesario desarrollar componentes de comunicación para cada una de las redes en particular.

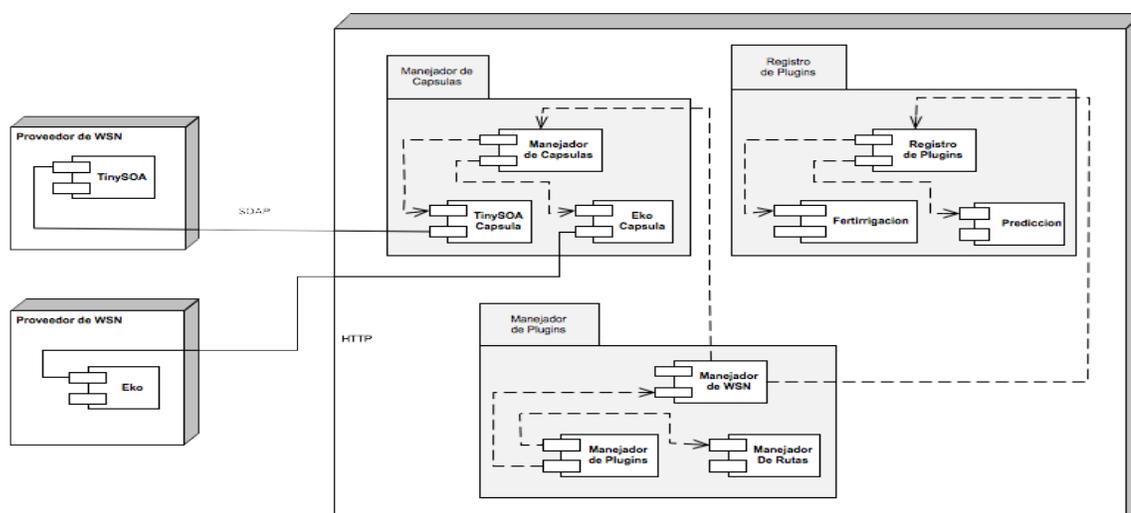


Figura 12: **Diagrama UML de emplazamiento que representa al sistema prototipo**

Los componentes que fueron desarrollados para brindar soporte a las redes están basados en el concepto de cápsulas introducido durante el desarrollo del *middleware* ActiveCloud. Las cápsulas proveen una serie de servicios de comunicación de alto nivel, mediante los cuales es posible interactuar con *hardware* heterogéneo. El uso de las cápsulas en este trabajo de investigación permitió al prototipo desarrollado brindar soporte a los dos kits de sensores mencionados al inicio de este capítulo. La implementación de los componentes de comunicación consistió en el desarrollo de cápsulas publicador y suscriptor para ambos kits, dichas cápsulas diseñadas en base a las especificaciones propuestas en la documentación del *middleware* ActiveCloud.

En el diagrama de emplazamiento también es posible visualizar la modularización lograda con uso del *framework* JPF, en base a las especificaciones de este último se desarrollaron dos plugins que brindan la funcionalidad propuesta como apoyo a las realizaciones de las tareas de fertirrigación y predicción del crecimiento de un cultivo, tal y como se describe en los requerimientos del sistema de monitoreo de cultivos presentados en el capítulo II.

En la figura 13, es posible visualizar el diagrama de clases que representa al sistema prototipo desarrollado, en este diagrama es posible visualizar la estructura del sistema, a través de sus clases, atributos y las relaciones entre ellos. Los componentes que conforman el diagrama son descritos en forma breve a continuación:

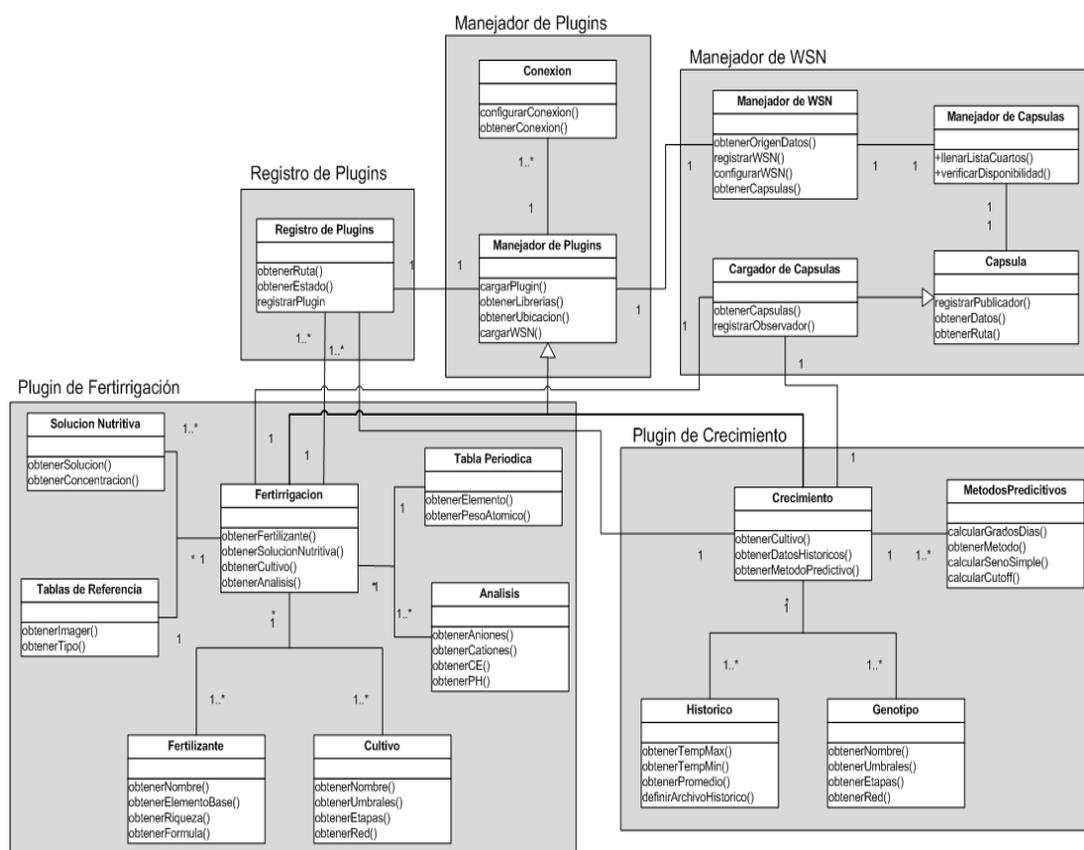


Figura 13: Diagrama UML de clases representa al sistema prototipo

- **Clase Manejador de Plugins.** Clase principal del sistema que implementa las funciones principales de los plugins, así como todos los mecanismos de control necesario como son validación, carga de plugins y cápsulas, así como la verificaciones de seguridad.
- **Clase Conexión.** Esta clase carga todos los parámetros de red necesarios, para el correcto funcionamiento de las cápsulas disponibles en el sistema.
- **Clase Registro de Plugins.** La siguiente clase se encarga de registrar todos los plugins que se cargaron exitosamente al inicio de la ejecución del sistema. El registro consiste en agregar las nuevas funcionalidades a la interfaz gráfica, así como mantener un registro de todas las librerías y archivos necesarios para el funcionamiento de cada uno de los plugins que han sido cargados al sistema.
- **Clase Manejador de WSN.** El manejador de WSN es la clase encargada de administrar cada una de las redes de sensores disponibles en el sistema, dicha clase se comunica directamente con el manejador de cápsulas.
- **Clase Manejador de Cápsulas.** Esta clase se encarga de registrar las cápsulas publicador y suscriptor, necesarias para el funcionamiento de cada una de las redes de sensores solicitadas por el manejador de WSN.
- **Clase Cápsula.** Esta clase proporciona los métodos de acceso a las características de las cápsulas que han sido registradas por la clase manejador de cápsulas.
- **Clase Cargador de Cápsulas.** Esta clase se encarga de poner disponibles al sistema, las cápsulas que han sido dadas de alta por la clase conexión.
- **Clase Fertirrigación.** Clase principal del plugin de fertirrigación, dicha clase hereda de la clase manejador de plugins.
- **Clase Solución Nutritiva.** Clase utilizada para administrar las soluciones nutritivas que serán utilizadas como nutrientes del cultivo en el plugin de fertirrigación.

- **Clase Tablas de Referencia.** En esta clase se implementan un visualizado de tablas de referencias usadas en la interpretación de análisis de agua y suelo.
- **Clase Fertilizante.** Clase que proporciona los métodos de acceso a las características de un fertilizante, como son riqueza, elementos que lo componen y formula entre otros.
- **Clase Cultivo.** La clase cultivo es la encargada de la gestión de la información nutritiva de cultivos disponibles en el plugin de fertirrigación. .
- **Clase Análisis.** En esta clase se implementan los métodos necesarios para interpretar los resultados de los análisis de agua y suelo.
- **Clase Tabla Periódica.** Clase que implementa métodos para consultar los valores de una tabla periódica de elementos, la cual es usada para obtener las propiedades de los elementos que conforman un fertilizante.
- **Clase Crecimiento.** Clase principal del plugin de crecimiento que hereda del manejador de plugins.
- **Clase Métodos Predictivos.** En esta clase se proporcionan los métodos necesarios para hacer uso de los diferentes modelos implementados, para el cálculo de los grados-día.
- **Clase Histórico.** Clase encargada de poner disponible al sistema, los datos históricos sobre máximos y mínimos de temperatura de una región determinada. El archivo de datos históricos es proporcionado por el usuario, a través de una plantilla xml propuesta en este trabajo.
- **Clase Genotipo.** Genotipo es el nombre de la clase encargada de gestionar la información de los cultivos disponibles, para el cálculo de predicciones de crecimiento.

IV.2.2. Plugin para predicción de crecimiento

Entre las funcionalidades requeridas para un sistema de monitoreo de cultivos que se propusieron en el capítulo III, se encuentra la realización de predicciones sobre el tiempo de crecimiento de un cultivo. Para dar soporte a este requerimiento, durante el diseño del sistema prototipo, se implementó un plugin para realizar dichas predicciones. En la Figura 14 se presenta el diagrama UML de casos de uso que muestra la interacción entre el usuario que administra el sistema y el plugin desarrollado.

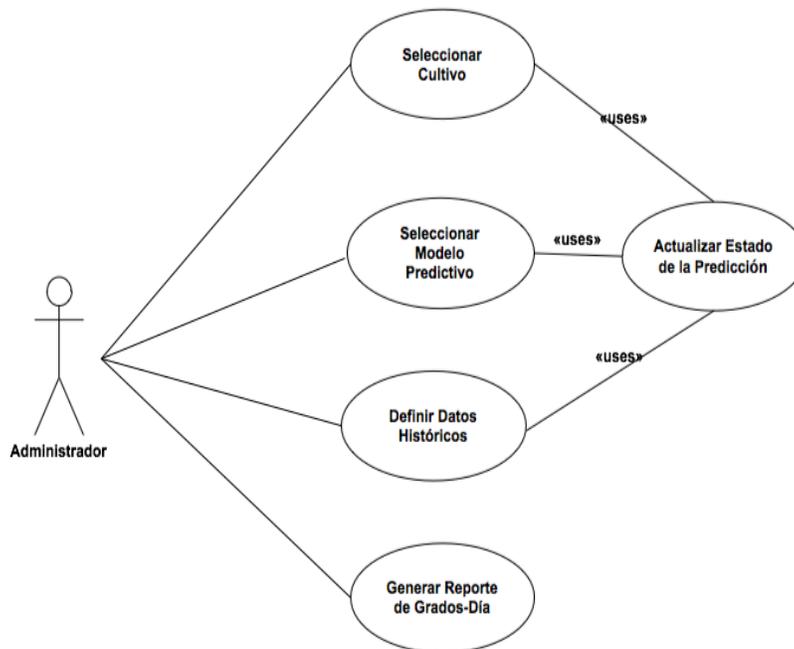


Figura 14: **Diagrama UML de caso de uso que representa el escenario de predicción de crecimiento de un cultivo**

Como es posible apreciar en el diagrama, entre las funcionalidades brindadas al usuario se encuentran la selección de: un cultivo, un método de predicción (véase Apéndice A) y archivo con datos históricos del clima de la región. Adicionalmente es posible visualizar un reporte con los resultados de la predicción, una vez que el estado de ésta última haya sido completado. Para que el estado de la predicción sea completado, es necesario seleccionar

un cultivo, un método predictivo e indicar un archivo de datos históricos. A continuación se presentan unas capturas de pantalla del sistema con los detalles del funcionamiento del plugin de predicción de crecimiento.

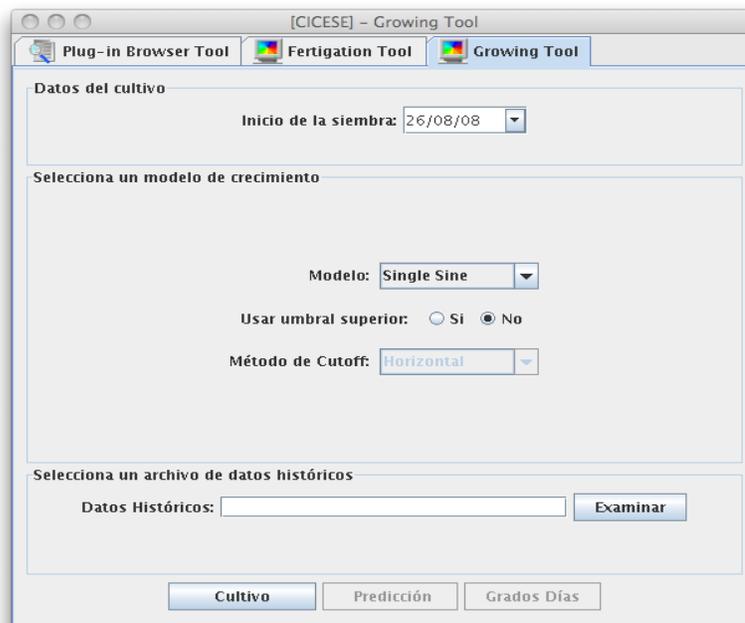


Figura 15: **Captura de pantalla del plugin de predicción de crecimiento**

En la Figura 15 se muestra la pantalla inicial del plugin, como es posible visualizar en la parte de arriba se define la fecha de inicio de la siembra del cultivo, en la parte central se selecciona el método predictivo, más abajo es posible seleccionar el archivo con los datos históricos a usar.

Al presionar el botón «Cultivo» que se presenta en la parte de abajo de la pantalla anterior es posible visualizar una imagen similar a la que se muestra en la Figura 16. En esta pantalla se encuentra toda la parte de administración de un cultivo. Es posible agregar un nuevo cultivo, así como seleccionar, borrar y modificar los ya existentes. Para dar de alta un nuevo cultivo es obligatorio llenar todos los campos del formulario, debido a que toda la información proporcionada es tomada en cuenta al momento de realizar una predicción.

Genotipo

Cultivo:

Nombre del Cultivo:

Nombre del Genotipo:

Nombre de la red:

Umbral Superior:

Umbral Inferior:

Etapas Fenológicas:

Stage Name	Degree Days	Duration
EF1	260	1
EF2	580	5
EF3	720	23
EF4	896	6
EF5	1565	10

Sobrescribir Existente: Si No

Cargar Guardar Nuevo Borrar

Figura 16: Captura de pantalla de la ventana de genotipo

Un vez que se ha realizado la selección del un cultivo, fijada la fecha de inicio de la cosecha, seleccionado un modelo de predicción y designado un archivo de datos históricos; es posible entonces realizar la predicción del crecimiento de un cultivo, para ello basta seleccionar el botón de predicción situado en la parte de abajo de la pantalla principal del plugin.

El resultado de la predicción se presenta en una pantalla similar a la que se muestra en la Figura 17. La información presentada puede ser dividida en dos partes izquierda y derecha. La información presentada en la parte izquierda corresponde a los grados-días recopilados desde el inicio de la fecha de la siembra, hasta el último día del tiempo de crecimiento ideal del cultivo seleccionado.

En la parte derecha hay dos partes, en la de arriba se muestra una relación de la duración en días de cada una de las etapas fenológicas del cultivo, se muestra además por cada

etapa, el día y los grados días acumulados en ese día. Cabe aclarar que los valores mostrados son productos de la aplicación del modelo predictivo, además se muestran la cantidad de grados-días acumulados para completar las necesidades requeridas por cada etapa fenológica.

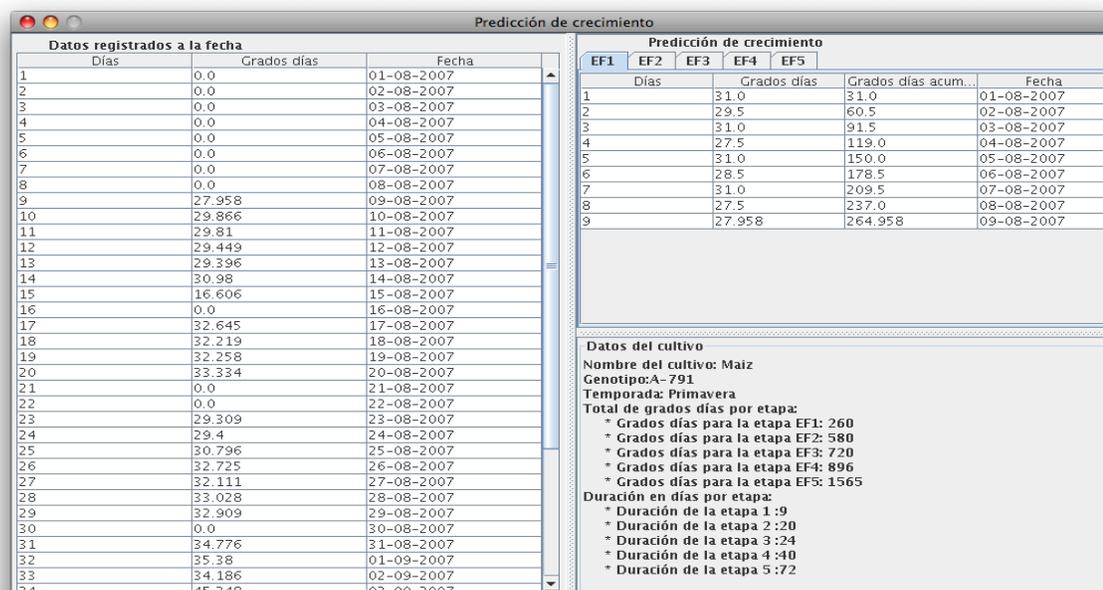


Figura 17: Captura de pantalla de la ventana de resultados para la predicción de crecimiento

IV.2.3. Plugin para fertirrigación

El segundo plugin desarrollado brinda la funcionalidad correspondiente al proceso de fertirrigación, recordando los conceptos explicados en el capítulo II, para calcular la cantidad de nutrientes disueltos en agua necesarios para un cultivo es necesario tomar en cuenta factores como el agua de riego, el suelo de siembra, el tipo de cultivo y el tipo de fertilizante que se quiere aplicar. En la Figura 18 se muestra el diagrama de secuencia que representa al plugin, en este diagrama es posible observar todas las interacciones entre el usuario y el sistema.

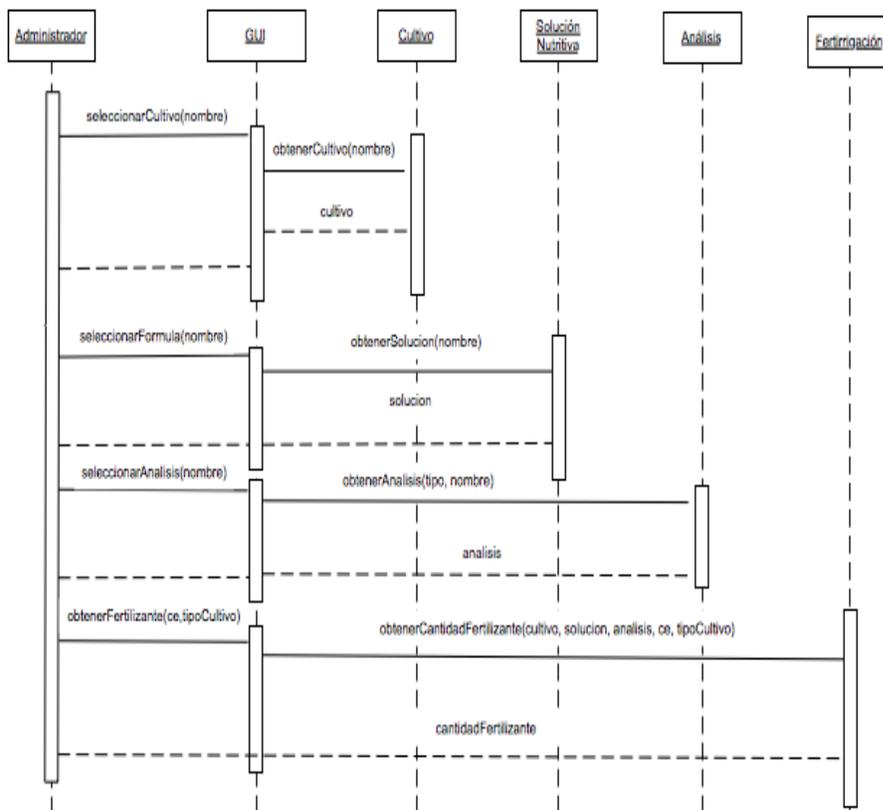


Figura 18: Diagrama UML de secuencia que representa la interacción del usuario con el sistema durante en el proceso de fertirrigación

La Figura 19 corresponde a la pantalla principal del plugin de fertirrigación, como es posible observar en la imagen la interfaz gráfica tiene un diseño muy sencillo. La idea es lograr una gran facilidad en su uso. En la parte superior de la pantalla se puede apreciar el botón «Calcular», para poder usarla es necesario haber definido primero algunos parámetros de entrada, tal y como se explicó en el párrafo anterior, el orden en que se realicen dichas tareas no tiene relevancia. Es importante definir el tipo de superficie en la cual se siembra, si la elección es sustrato no se tomará en cuenta la información proporcionada por el análisis de suelo, de este hecho su relevancia.

Como se mencionó en el capítulo II, la conductividad eléctrica nos ayudará a definir el tipo de desarrollo que se quiere del cultivo. Dependerá del valor que se le asigne, si se espera que la nutrición de la cosecha rinda el mayor número de frutos o se desea la máxima calidad posible.

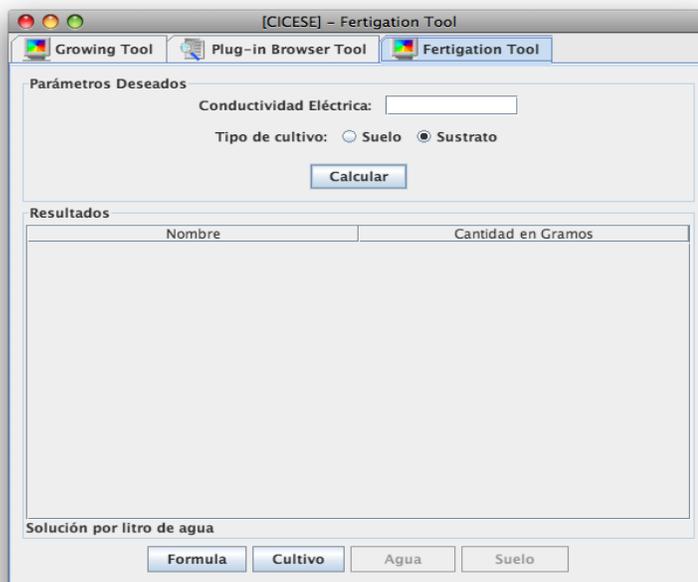


Figura 19: **Captura de pantalla del plugin de fertirrigación**

Para iniciar con el cálculo de la necesidad de los nutrientes del cultivo, lo primero que se sugiere hacer es definir una solución nutritiva, con la cual se fertilizará el cultivo, para definir una solución nutritiva, basta con seleccionar una de las ya disponibles, tal como se muestra en la Figura 20.

En la captura de pantalla anterior es posible visualizar las características del fertilizante como son: los elementos químicos que lo conforman, así como el porcentaje de concentración de cada uno de ellos. Adicionalmente es posible agregar nuevos fertilizantes llenando todos y cada uno de los campos necesarios. La forma en la que podemos determinar el tipo de solución nutritiva necesaria para cada cultivo se presenta en el Apéndice B.

Elemento	Concentración en %
KNO3	7.4
Ca(NO3)2	3.1
Mg(NO3)2	1.5
NH4NO3	1.0
MgSO4	2.0
H3PO4	3.0

Figura 20: **Captura de pantalla de la ventana de solución nutritiva**

Una vez que se ha definido el tipo de solución nutritiva con la que se quiere trabajar, es necesario seleccionar el cultivo que se quiere nutrir, para ello basta con presionar en el botón «Cultivo» de la pantalla principal, enseguida podremos visualizar una pantalla similar a la que se presenta en la Figura 21. En esta ventana es posible agregar un nuevo tipo de cultivo, especificando la cantidad de nutrientes necesaria para cada una de sus etapas fenológicas, en diferentes periodos del año.

Los nutrientes necesarios para cada tipo de cultivo dependen del tipo de semilla, la región, periodo del año. Es responsabilidad del usuario del sistema, determinar cuales son los valores correctos para la región en donde se utilice el sistema. Sin embargo con el desarrollo de este plugin se proporciona una solución nutritiva genérica, llamada solución nutritiva de Steiner.

Cultivo: **Tomate**

Nombre del cultivo: Tomate

Nombre de la red: NetServ8

Nutrientes requeridos:

Elemento	Cantidad Meq/l
Carbonato	22.6
Bicarbonato	11.4
Cloruro	8.3

Sobrescribir Existente: Si No

Cargar Guardar Nuevo Borrar

Figura 21: Captura de pantalla de la ventana de cultivo

Ya habiendo seleccionado una solución nutritiva y un cultivo, solo queda seleccionar los análisis de agua y suelo con los que se quiere trabajar. El análisis de suelo será necesario cuando se trabaje con cultivos sembrados directamente en suelo, por lo que cuando tengamos cultivos sobre sustrato o hidropónicos, dicho análisis no será necesario. En la Figura 22 se visualizan los formatos para análisis de suelo y agua.

Cada uno de los formatos de análisis proporciona la funcionalidad de interpretar los valores que han sido introducidos. Para el caso del agua se determinan dureza y capacidad de infiltración, etc. Para el suelo se determina la capacidad de intercambio catiónico y los niveles de sodio, entre otros. Adicionalmente se proveen herramientas para la administración como son: agregar, modificar y borrar análisis. El formulario para captura de los análisis está basado en el formato oficial utilizado por los laboratorios de la ciudad de Baja California, (véase Sección C.3).

Análisis de Agua

Selecciona un análisis: **Acuicultura**

Nombre del análisis:

Conductividad eléctrica (dS/m):

Potencial de Hidrógeno (pH):

Aniones

Elemento	me./l	p.p.m.
Nitratos	1.23	39.36
Fosfatos	0.35	21.7
Sulfatos	2.24	107.520000000...
Carbonatos	0	0
Bicarbonatos	6.5	396.5
Cloruros	1.56	54.6

Cationes

Elemento	me./l	p.p.m.
Calcio	6.25	125.0
Magnesio	2.36	28.32
Potasio	0.78	30.42
Sodio	2.54	58.42

Sobrescribir Existente: Sí No

Análisis de Suelo

Selecciona un análisis: **Temporada1**

Nombre del análisis:

Conductividad eléctrica (dS/m):

Potencial de Hidrógeno (pH):

Aniones

Elemento	me./l	p.p.m.
Carbonatos	1.0	30.0
Bicarbonatos	2.0	122.0
Cloruros	3.0	105.0
Sulfatos	4.0	192.0
Fosfatos	5.0	310.0
Nitratos	6.0	192.0

Cationes

Elemento	me./l	p.p.m.
Calcio	7.0	140.0
Magnesio	8.0	96.0
Sodio	9.0	207.0
Potasio	10.0	390.0

Sobrescribir Existente: Sí No

Figura 22: Captura de pantalla de la ventana de los análisis de agua y suelo

Una vez que se ha seleccionado un cultivo, una solución nutritiva, los análisis necesarios y se ha definido una conductividad eléctrica. Es posible entonces calcular la cantidad de fertilizante requerida en una porción de agua, para ello es necesario oprimir el botón «Calcular» en la ventana principal del plugin, enseguida se podrá visualizar una pantalla similar a la que se presenta en la Figura 23. En la tabla central aparece un listado con las porciones necesarias de cada fertilizante por litro de agua.

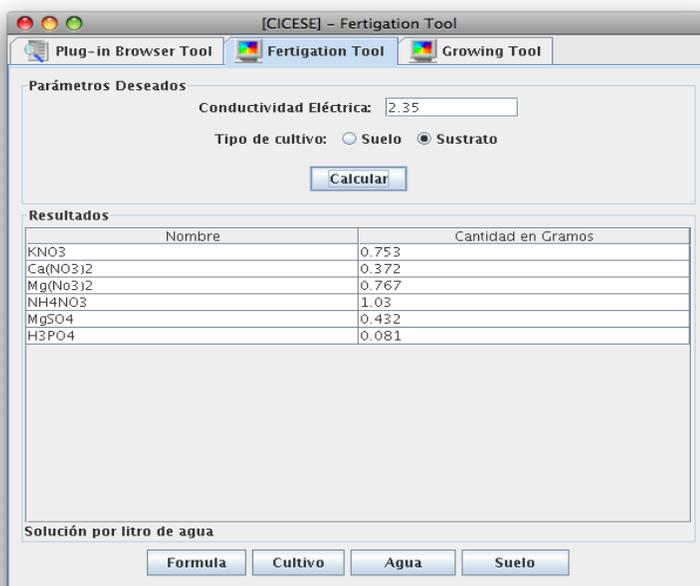


Figura 23: Captura de pantalla de la ventana de los resultados de fertirrigación

IV.3. Conclusión

A lo largo de este capítulo se realiza una descripción del diseño e implementación del sistema prototipo. Dicho sistema tiene como objetivo brindar una herramienta de software de apoyo a la realización de tareas como son la fertirrigación y la predicción del crecimiento de un cultivo. Como fue posible apreciar en las pantallas de captura del sistema, el diseño de la interfaz de usuario es bastante sencillo, aspecto que fue bastante cuidado durante el diseño del mismo. El objetivo de simplificar el diseño de la interfaz es maximizar aspectos como la facilidad de uso y disminuir el tiempo de interacción entre el usuario y el sistema. Para más detalles sobre el funcionamiento del sistema consulte el Apéndice D.

Evaluación, Resultados y Discusión

*«El saber no se obtiene por azar.
Hay que buscarlo con afán
y alimentarlo con diligencia»*
– Abigail Adams (1744-1818)

En este capítulo se presenta la evaluación del prototipo implementado. Dicha evaluación fue realizada mediante un experimento con usuarios potenciales y diseñada con el propósito de comparar el uso del sistema desarrollado y el método tradicional, mediante la realización de diversas actividades y de esta forma poder identificar fortalezas o debilidades funcionales y de diseño del sistema que se está proponiendo.

A lo largo de este capítulo se presentarán las diversas fases que integran la evaluación, los diferentes medios utilizados para obtener información relevante del estudio; así como los resultados obtenidos al finalizar dicha evaluación, realizando comparaciones entre el uso del sistema propuesto y el método tradicional.

V.1. Objetivo de la evaluación

El objetivo general de la evaluación del sistema funcional es estimar el grado en que el sistema propuesto es capaz de apoyar en la toma de decisiones a los usuarios de cultivos protegidos. Así como probar su facilidad percibida de uso, utilidad percibida, confiabilidad y beneficios en el manejo de la información obtenida de un cultivo en particular.

V.2. Diseño del experimento

El experimento contó con la participación de 17 personas, todos estudiantes de la carrera de Ingeniería en Agronomía, de sexo masculino en un rango de edad entre 20 y 24 años, todos con al menos un año de haber ingresado a la carrera. La población incluyó personas que ya contaban con previo conocimiento en el área de fertirrigación y manejo del crecimiento de un cultivo. Al inicio del experimento se les brindó una breve plática sobre las áreas anteriormente mencionadas, enfatizando su importancia en el sector agrícola, posteriormente se les asignó a cada uno de los participantes dos tareas, las cuales consistían en calcular la cantidad de nutrientes requerida para un cultivo en particular y estimar la duración del crecimiento de un cultivo, en una fecha de siembra seleccionada aleatoriamente. Por último se les solicitó que contestaran un cuestionario, cuyos resultados son discutidos al final de la presente sección.

V.2.1. Variables del experimento

Antes de iniciar el experimento es necesario definir las variables que vamos a medir y la manera en la que lo haremos. Una variable se puede definir como todo aquello que vamos a medir, controlar y estudiar en una investigación o estudio (Pick y López, 1995). En seguida se presentan las variables independientes y dependientes definidas en esta investigación.

Variable Independiente

- El prototipo desarrollado

Variables Dependientes

- Utilidad percibida
- Facilidad percibida de uso
- Confiabilidad de los resultados obtenidos

- Intención de uso del prototipo

V.2.2. Muestra

Para la realización de esta evaluación se contó con la participación de estudiantes de la Escuela de Ingeniería y Negocios de la UABC campus San Quintín B.C. Se seleccionaron 17 alumnos de forma aleatoria, entre los diferentes semestres que conforman la carrera de Ingeniería en Agronomía.

Todos los participantes contaban con conocimientos básicos del uso y manejo de una computadora, lo cual es útil puesto que es necesario interactuar con el sistema de software propuesto, para poder realizar la mayoría de las actividades planeadas en la evaluación. Es importante tomar en cuenta este aspecto pensando en que la percepción de los participantes no está influenciada por el hecho de no tener conocimiento del funcionamiento básico de una computadora.

V.2.3. Tareas a realizar

Durante la evaluación los participantes realizaron dos diferentes tareas, la primera consistió en calcular el tiempo que tardará un cultivo en desarrollarse totalmente, así como la duración de cada una de sus etapas de crecimiento, tal y como se muestra en la Figura 24. En esta tarea se utilizaron los datos de un cultivo de maíz sembrado en la primavera del 2007 y con 5 etapas fenológicas durante su crecimiento.

En la segunda tarea era necesario calcular la cantidad requerida de fertilizante para un cultivo de tomate en plena floración con tezontle como sustrato y una conductividad eléctrica deseada de 2.35, tal y como se muestra en la Figura 25. Para esta tarea se utilizó la formula nutritiva de Steiner (Steiner, 1984), así como los resultados de un análisis de agua definidos especialmente para la realización de esta evaluación.

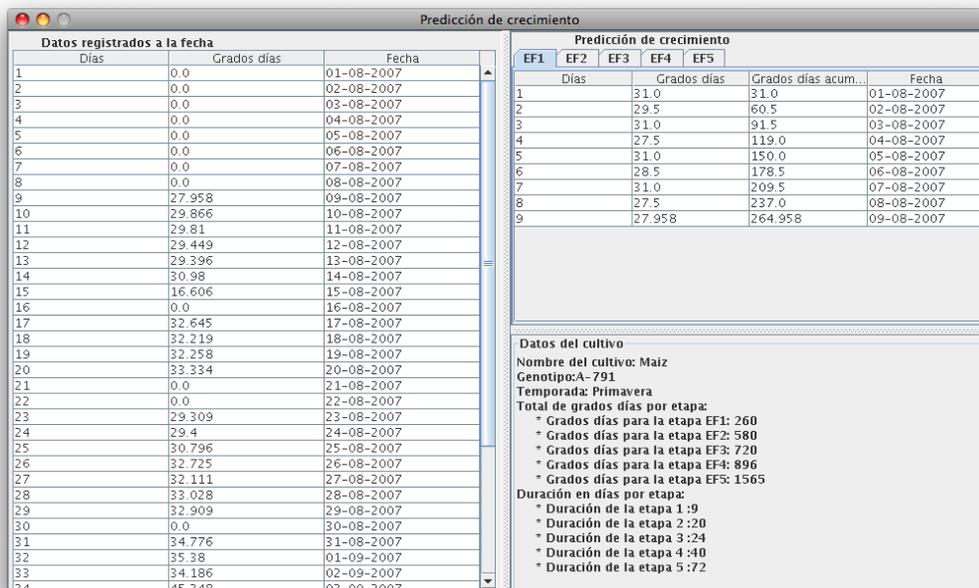


Figura 24: Resultados de la predicción del crecimiento para un cultivo de maíz

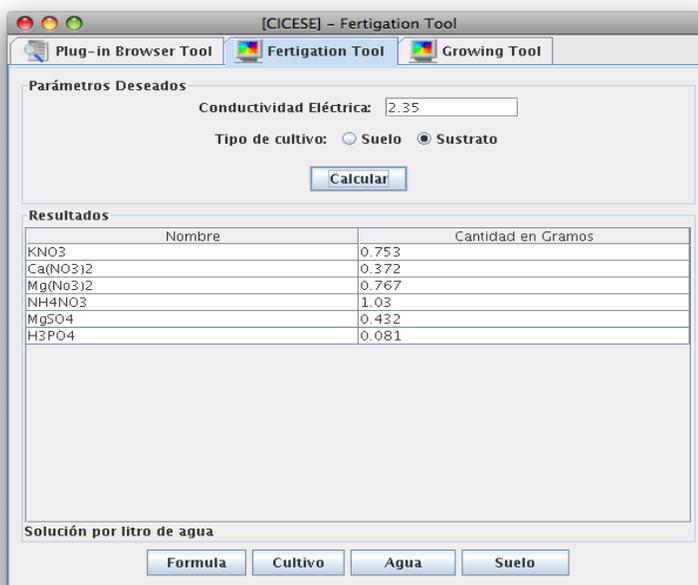


Figura 25: Resultados de la predicción del crecimiento para un cultivo de maíz

V.2.4. Condiciones del experimentos

Para la realización de este experimento se contó con el centro de cómputo de la Escuela de Ingeniería y Negocios de la UABC, donde se nos proporcionaron 3 computadoras de escritorio con acceso a Internet y con la instalación necesaria para la ejecución del sistema desarrollado (Java y MySQL). De forma adicional se instaló un servidor con el sistema TinySOA (Avilés y García, 2007) en una de las máquinas, dicho sistema proveyó los datos de una red de sensores, necesarios para el funcionamiento del sistema desarrollado.

V.2.5. Procedimientos

En el desarrollo de esta evaluación solamente fue necesaria una sesión. Durante el inicio se brindó una breve introducción sobre la teoría de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo a todos los participantes. Posteriormente se les explicó la forma en la que estaba conformado el sistema desarrollado, indicando cada uno de los componentes, los servicios que éste ofrece y cómo utilizarlo. Una vez concluída la introducción, se procedió a indicarles las tareas a realizar. Para lo cual los participantes utilizaron el sistema desarrollado. Adicionalmente se les brindó apoyo en cualquier duda surgida con el uso del sistema.

V.3. Resultados y discusión

Con el objetivo de obtener información que permitiera responder a las preguntas de investigación planteadas en el capítulo 2, cada uno de los participantes de la evaluación respondió un cuestionario de 19 preguntas utilizando una escala Likert (Likert, 1932), tal como se muestra en el Apéndice C. Dicho cuestionario fue diseñado para medir tres diferentes factores, dos de los cuales están basados en el modelo TAM (Davis, 1989). A través de estos dos factores fue posible medir la aceptación general del sistema desarrollado en cuanto a facilidad de uso, utilidad e intención de uso, tal como se muestra en la Tabla I.

El numero total de oraciones que completan el cuestionario es de 19, las cuales están

Concepto	Preguntas
Facilidad Percibida de Uso	2, 5, 8, 11, 13, 14, 17
Utilidad Percibida	3, 6, 9, 12, 15, 16, 18, 19
Confiabilidad	1, 4, 7, 10

Tabla I: **Relación de preguntas por grupos**

planteadas utilizando una escala Likert con un rango como se muestra en la Tabla II.

Escala Propuesta	
Valor	Numeración
1	No, con total seguridad
2	Probablemente no
3	Indiferente
4	Probablemente sí
5	Sí, con total seguridad

Tabla II: **Escala propuesta**

La escala Likert es un tipo de preguntas en donde se pide que se califique el nivel en el cual se está de acuerdo o no con una cierta oración. La idea de su uso en esta evaluación es medir la percepción de los participantes sobre uno o varios factores, en la Tabla I es posible visualizar en número de preguntas correspondientes a cada factor medido durante esta evaluación.

V.3.1. Utilidad percibida de uso

Utilidad Percibida	
Pregunta	Promedio
3	4.059
6	3.588
9	4.471
12	4.471
15	3.059
16	3.294
18	4.118
19	4.529
Promedio Total	3.949

Tabla III: **Resultados obtenidos para Utilidad Percibida**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la evaluación para la utilidad

percibida del sistema, como se muestra en la Tabla III el promedio fue de 3.949, lo cual implica que dicho factor fue calificado positivamente ya que se encuentra muy cercano a 4 (en la escala de 1 a 5) correspondiendo a «probablemente sí». Conociendo este resultado podemos contestar la quinta pregunta de investigación de la Sección I.3, ¿Qué tanto facilita un sistema de software, la realización de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo?. Los resultados presentados en la tabla anterior muestran que la mayoría de los participantes de la evaluación percibieron que el sistema desarrollado facilita la realización de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo.

V.3.2. Facilidad percibida de uso

Facilidad Percibida de Uso	
Pregunta	Promedio
2	4.35
5	3.88
8	3.65
11	3.24
13	4.176
14	4.353
17	4.176
Promedio Total	3.975

Tabla IV: **Resultados obtenidos para Facilidad Percibida de Uso**

En la Tabla IV es posible visualizar que el factor de facilidad percibida de uso fue calificado con un promedio de 3.975, ya que se encuentra muy cercano a 4 (en la escala de 1 a 5) correspondiendo a «probablemente sí». La puntuación obtenida nos indica que la percepción de la mayoría de los participantes de la evaluación es que un sistema de software es útil en la elaboración de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo, dicho resultado viene a responder entonces a la sexta pregunta de investigación expuesta en la Sección I.3, ¿Qué tan útil es, un sistema de software para la elaboración de las tareas de fertirrigación y predicción del crecimiento de un cultivo?.

Confiabilidad	
Pregunta	Promedio
1	3.53
4	3.24
7	3.94
10	4.12
Promedio Total	3.71

Tabla V: **Resultados obtenidos para Confiabilidad**

V.3.3. Confiabilidad percibida

El último factor medido en esta evaluación es la confiabilidad, la cual se refiere a un cierto grado de seguridad de que un sistema de software opera exitosamente en un ambiente específico durante un cierto periodo de tiempo. Para el caso de esta evaluación, se midió la percepción de los participantes, sobre la seguridad de los resultados arrojados por el sistema desarrollado, en comparación a la forma en que tradicionalmente se realizarían las tareas de fertirrigación y predicción del crecimiento de un cultivo.

En la Tabla V se muestran los resultados obtenidos con la aplicación del cuestionario. Como es posible visualizar, el promedio obtenido para el factor de confiabilidad es de 3.71, el cual por su cercanía a 4 (en la escala de 1 a 5) corresponde a «probablemente sí». La puntuación obtenida muestra que los participantes mostraron más confianza en los resultados obtenidos por el sistema, lo que responde a la octava pregunta de investigación de la Sección I.3, ¿Que tan confiables son los resultados arrojados, por un sistema de software para la elaboración de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo, en comparación a los del método tradicional?

Complementando las conclusiones anteriores, podemos ver en la Figura 26 la frecuencia con la que se contestaron cada una de las preguntas correspondientes al factor de confiabilidad evaluado. Como se indica en la gráfica el 56 % de los participantes seleccionó la opción 4 de la escala.

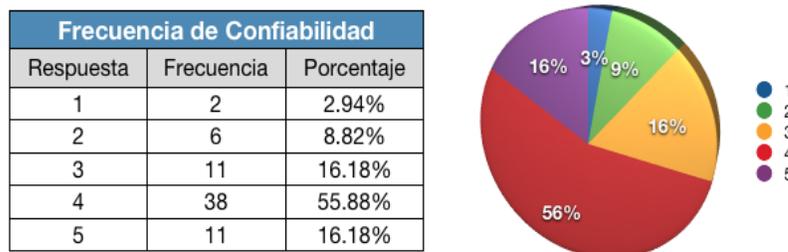


Figura 26: **Porcentaje de confiabilidad**

V.3.4. Disposición de adopción

La intención de utilizar una tecnología viene determinada por la actitud del individuo hacia el uso de esa tecnología (Moore y Benbasat, 1991) . A su vez, la actitud viene determinada por la utilidad percibida y la facilidad percibida de uso. Utilizaremos entonces estos dos factores como medida para determinar el uso del sistema final. Conociendo los resultados de los dos factores previamente mencionados podemos obtener un promedio de 3.962 para la intención de uso del sistema desarrollado, dado que dicho valor es muy cercano a 4 (en la escala de 1 a 5) le corresponde «probablemente sí». La Figura 27 muestra el promedio de las respuestas de adopción de la tecnología agrupadas utilizando el modelo TAM.

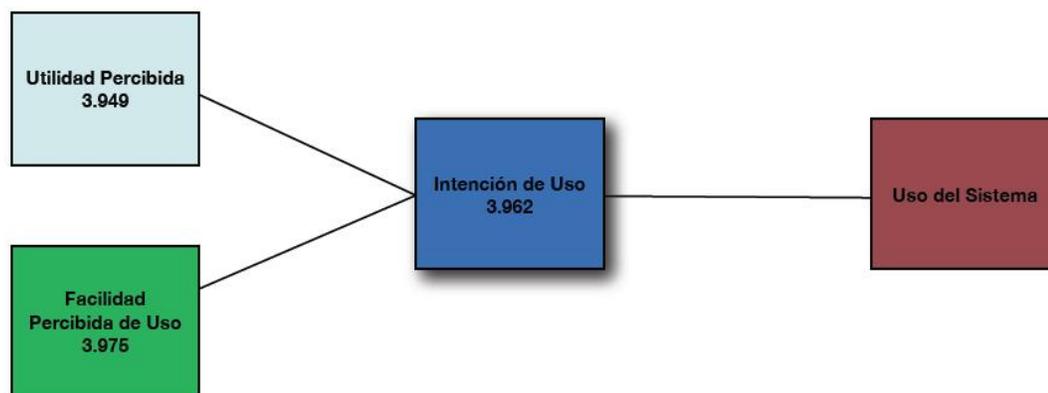


Figura 27: **Modelo de adopción de la tecnología**

Conociendo la puntuación promedio para la intención de uso del sistema y en base a los resultados mostrados en la Figura 28, en donde se muestra que el 38.43 % de los participantes respondió que «probablemente sí» (4 en la escala de 1 a 5) tienen intenciones de usarlo y el 37.65 % que «seguramente sí» (5 en la escala de 1 a 5) tienen intenciones de usarlo, podemos entonces concluir que la mayoría de los participantes mostraron intención de usar del sistema para realizar las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo, con lo que es posible responder entonces, la séptima pregunta de investigación de la Sección I.3, ¿Qué tanta intención de uso hay por parte de los usuarios, hacia un sistema de software para la elaboración de las tareas de fertirrigación y predicción de crecimiento de un cultivo?

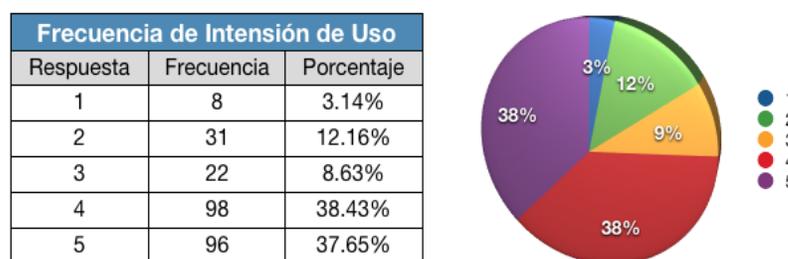


Figura 28: Frecuencias obtenidas en las preguntas sobre intención de uso

V.3.5. Experiencias recabadas

Con el fin de complementar los resultado presentado a lo largo de este capítulo, se realizó la instalación de una red inalámbrica de sensores, en las instalaciones de la empresa productora de tilapia y hortalizas (Acuicultura del Desierto) ubicada en el Valle de Guadalupe. Esto con el fin de monitorear sus cultivos, tanto en invernadero como a cielo abierto. La instalación de dicha red fue a partir del inicio del desarrollo de este trabajo de investigación, por lo que se contó con un tiempo considerable para la recopilación de información climática necesaria para el funcionamiento del sistema desarrollado, tal como se menciona en la Sección IV.2.2.

En el caso particular de Acuicultura del Desierto, con la información recopilada por la red de sensores fue posible determinar que si se retrasaba dos meses en inicio de la siembra de tomate durante el otoño se disminuye el riesgo de daños al cultivos por fenómenos climatológicos. Por otra parte pudo determinarse que si la rotaran 90 grados las construcciones de los invernaderos, se lograría mejor ventilación de los mismos, factor que será tomado en cuenta para futuras construcciones, según mencionaron los dueños del lugar. De manera adicional, cuando se cuestionó a la gente encargada del manejo de los cultivos sobre la introducción del sistema desarrollado en sus instalaciones; mencionaron que además de los beneficios que proporciona el sistema en base a las funcionalidades anteriormente descritas, la información proveída podría ayudarles a realizar un calendario de riego, un programa de fertilización y un mejor manejo de la materia prima necesaria el desarrollo del cultivo.

V.3.6. Conclusiones

Los resultados obtenidos durante la realización de la evaluación son una muestra del cumplimiento de los requerimientos de la arquitectura propuesta en el capítulo IV.

Durante la evaluación los participantes aprendieron a realizar las tareas de cálculo de los fertilizantes requeridos por un cultivo en un porcentaje de agua dado, así como a realizar la predicción del crecimiento de un cultivo en base al uso de los grados-día (véase Apéndice A). Después de utilizar el sistema se midió su intención de uso sobre el sistema desarrollado, en base a los factores establecidos en el modelo TAM.

Por otra parte se realizaron mediciones sobre la percepción de confiabilidad del sistema en base a los resultados arrojados por este, las puntuaciones obtenidas arrojaron que los participantes percibieron mayor confiabilidad por parte del sistema, todo ello después de conocer la forma en la que se realizan las tareas manualmente. Sin embargo, es interesante hacer notar que las conclusiones respecto a confiabilidad pueden también apoyarse

de factores externos a los medidos.

El sistema desarrollado, utiliza una serie de algoritmos matemáticos para la realización de la predicción del crecimiento del cultivo y la cantidad de fertilizante requerido, además se apoya de la información climática obtenida por los sensores, datos históricos de la región, especificaciones nutricionales de los cultivos y descripciones químicas de los fertilizantes. Toda esta información tendría que procesarse manualmente si no se contará con un sistema como el propuesto, por lo que su utilización proporciona un importante ahorro de tiempo y una mayor precisión al momento de realizar operaciones con todas las variables anteriormente mencionadas. El escenario anterior sugiere que la realización de las tareas de fertirrigación y predicción del crecimiento de un cultivo, implican bastante complejidad para su realización manual, por lo que su realización a través de un sistema de software aumenta el nivel de confiabilidad de los resultados calculados con respecto a el método manual.

La Tabla 29 muestra la frecuencia con la que cada uno de los elementos de la escala (de 1 a 5) utilizada, fueron requeridos durante la realización de esta evaluación. Puede verse que el elemento 4 fue el más utilizado, ya que está presente en el 42 % de las respuestas, seguido del elemento 5 con el 33 %, en síntesis, podemos decir que la mayoría de los participantes calificó el cuestionario positivamente para los factores evaluados, lo cual concuerda con los resultados presentados a lo largo de esta sección.

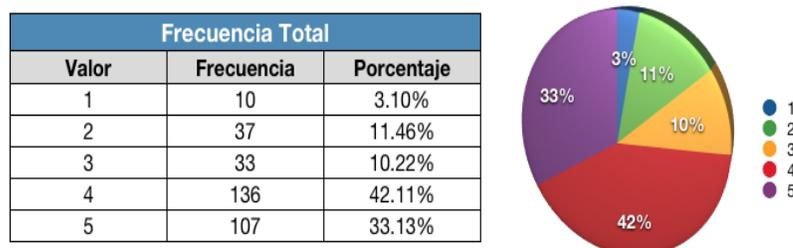


Figura 29: Frecuencia total obtenida por cada uno de lo valores de la escala (1 a 5)

Capítulo VI

Conclusiones

*“Un comienzo no desaparece nunca,
ni siquiera con un final”.*

– Harry Mulisch (1927-)

La tecnología de redes inalámbricas de sensores WSN pone en manos de los responsables del manejo de los cultivos en el campo la posibilidad de medir con precisión aspectos climatológicos que afectan el volumen de las cosechas; disponer de información básica del clima ayuda en la prevención de daños a cultivos y ataques de plagas y enfermedades.

Esta tesis centra su atención en la relevancia que tiene la tecnología de redes inalámbricas de sensores en el monitoreo de parámetros ambientales, así como su apoyo en la toma de decisiones en el manejo de cultivos, mediante el aporte de información confiable sobre el estado climático del medio donde se produce una cosecha.

Todavía queda mucho trabajo que realizar, es por eso que continuar con el desarrollo de tecnologías que apoyen a la realización de actividades tan importantes como es la agricultura a nivel mundial, es de suma importancia. Los avances que hasta el momento se han logrado, hacen posible la construcción de prototipos que nos demuestran sus beneficios. Gracias a la continua evolución y disminución de costos de la tecnología, no es de extrañarse que en un futuro no muy lejano se pueda contar con el uso masivo de redes de sensores para monitoreo de cultivos y del medio ambiente en general.

VI.1. Aportaciones

Consideramos que las principales aportaciones de este trabajo de investigación han sido las que se listan a continuación:

- Se estudió a detalle la información, el uso, y manejo que se le da a las redes inalámbricas de sensores en el monitoreo de cultivos, del cual pudimos detectar que mediante el uso de la tecnología desarrollada se pueden proporcionar beneficios interesantes a las personas encargadas del manejo de las cosechas. Esto se logra mediante una clara y entendible presentación de la información del estado del cultivo en tiempo real, así como la disponibilidad de ésta en todo momento.
- Se propuso una arquitectura de *software* para monitoreo de cultivos, tomando en cuenta el uso de las redes inalámbricas de sensores y un conjunto de características que permitan su extensibilidad a través del manejo de *plugins*, para de esta forma no imponer un paradigma de diseño único. La arquitectura fue cuidadosamente diseñada para brindar soporte a las plataformas WSN disponibles actualmente, haciendo de su adopción una realidad y permitiendo su uso en la solución de un problema.
- Se desarrolló una aplicación prototipo basada en la arquitectura propuesta para monitoreo de cultivos, que provee funcionalidad de apoyo en la toma de decisiones. Este sistema de software se encuentra a un nivel de desarrollo totalmente funcional, pudiendo de esta forma ser utilizado en el desarrollo de futuras extensiones a esta investigación.
- Se realizó una evaluación para medir la aceptación de uso de la tecnología desarrollada. La cual se llevó a cabo utilizando el sistema desarrollado, para que los participantes pudieran observar las posibles ventajas y desventajas que les proporcionaría en el apoyo a la toma de decisiones, para la realización de las tareas de fertirrigación y predicción del crecimiento de un cultivo, y así poder brindar su percepción al respecto.

VI.2. Trabajo Futuro

Sin lugar a dudas todavía falta mucho trabajo que hacer, el trabajo de tesis fue realizado de acuerdo a los alcances establecidos desde el inicio, sin embargo fueron identificadas algunas oportunidades de trabajo en cuanto al diseño de la arquitectura propuesta y a la implementación del sistema prototipo, las cuales son presentadas a continuación:

- Expandir el diseño de la arquitectura, para brindar soporte a aplicaciones de control a través del uso de distintos tipos de dispositivos como actuadores.
- Diseñar una estrategia para la identificación y configuración automática de las redes inalámbricas de sensores disponibles para el uso del sistema prototipo.
- Realizar una evaluación del sistema prototipo durante periodos extendidos de tiempo, utilizado a personas encargadas del manejo de cultivos y agrónomos, de tal forma que los usuarios puedan incorporar el uso de prototipo a sus actividades diarias, y así contrastar las diferencias entre los resultados arrojados por sistema y el método que tradicionalmente utilizan.
- Desarrollar nuevos *plugins* que brinden funcionalidades adicionales al sistema prototipo, como son: predicción de plagas y enfermedades, manejo de riegos y monitoreo del medio ambiente en general.

Bibliografía

- Akyildiz, Ian.F., Su, Weilian, Sankarasubramaniam, Yogesh y Cayirci, Erdal. 2002. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 47:102–114 p.
- Avilés, E. 2006. *Arquitectura Orientada a Servicios para Redes Inalámbricas de Sensores*. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, México.
- Avilés, E. y García, J.A. 2007. Providing Service-Oriented Abstractions for the Wireless Sensor Grid. *Lecture Notes in Computer Science*, 4459:710–715 p.
- Ayers, R.S. y Wescott. 1994. Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage*, 29:30–45 p.
- Blackmore, S. 1994. Precision Farming: An Introduction. *Outlook on Agriculture*, 4:275–280 p.
- Cadahía, C. 1998. *Fertirrigación de cultivos Hortícolas y ornamentales*. Mundiprensa. Segunda edición. 475 pp.
- Castrillón, C.E. y Perlaza, Jose F. 2007. Automatización de la Caracterización del Microclima para Invernaderos y Cuartos de Crecimiento. *National Instrumens*, 9–18 p.
- Conti, M. y Giordano, S. 2007. Multihop Ad Hoc Networking: The Theory. *IEEE Communications Magazine*, 45:78–86 p.
- Crossbow. 2008. eKo Datasheet. URL http://www.xbow.com/eko/Images/eKo_brochure_Crossbow.pdf. Consultado en Julio de 2008.
- Culler, D.E. y Hong, Wei. 2004. Wireless Sensor Networks. *Communications of the ACM*, 47:30–33 p.
- David, L., Ehret, A.L., Shabtai, Bittman, We, Lin y Shelford, Tim. 2001. Automated Monitoring of Greenhouse Crops. *Agronomie*. 21:403–414 p.
- Davis, F. 1989. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3):318–340 p.
- de Alba, G. 2000. El Presente y el futuro de la Agricultura en México 2 / 2. *Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey*, 5–10 p.
- Ehret, D., Helmer, T. y Bittman, S. 2003. Automated Monitoring of Greenhouse Vegetables. Pacific Agri-Food Research Centre. *Agassiz*, 1:403–414 p.
- Fournier, L. y Charpantier, C. 1978. El tamaño de la muestra y la frecuencia de las observaciones en el estudio de las características fenológicas de los árboles tropicales. *Cespedesia*, 7(2):25–26 p.

- Garlan, David y Shaw, Mary. 1993. An Introduction to Software Architecture. In V. Ambriola y G. Tortora, editors, *Advances in Software Engineering and Knowledge Engineering*. World Scientific Publishing Company, Singapore, 1–39 p.
- Hodges, T. y Doraiswamy, P.C. 1979. Crop phenology literature review for corn, soybean, wheat, barley, sorghum, rice, cotton and sunflower. *Terra*, 17(3):30 p.
- Jackson, M.L. 1976. *Análisis Químico de Suelos*. Omega. Segunda edición. 14–19 pp.
- Langendoen, K., Baggio, A. y Visser, O. 2006. Murphy Loves Potatoes: Experiences From a Pilot Sensor Network Deployment in Precision Agriculture. *Parallel and Distributed Processing Symposium*, 20:8 p.
- Lara, A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Agristars Technical Report*, 1(1830):5–9 p.
- Likert, R. 1932. A Technique for the Measurement of Attitudes. *Archives of Psychology*, 140:1–55 p.
- Liu, Hui, Meng, Zhijun y Cui, Shuanghu. 2007. A Wireless Sensor Network Prototype for Environmental Monitoring in Greenhouses. *WiCom 2007*, 1:2344–2347 p.
- Moore, G. y Benbasat, I. 1991. Development of an instrument to measure the perceptions of adopting an information technology. *Information Systems Research*, 2(3):192–222 p.
- Navarro, G.M. 1997. Fertirrigación de Cultivos Hortícolas. *Manual del Curso Teórico-Práctico*, 78 p.
- Navarro, G.M. 2000. Fertirrigación del Cultivo de Brócoli. *Curso de capacitación*, 67 p.
- Ochoa, L., Kemper, N., Rossel, C. y Pérez, F. 2007. SIPPEM: Sistema Inteligente para la Predicción de Plagas y Enfermedades en el Cultivo del Jitomate. *CiComp'07*, 7 p.
- Olea, C. 2008. *Arquitectura Modular para Redes Inalámbricas de Sensores y Actuadores*. Tesis de maestría, CICESE, Ensenada, México.
- Pick, S. y López, A. 1995. *Cómo Investigar en Ciencias Sociales*. Trillas. Quinta edición. ISBN 968-24-4928-6. 160 pp.
- Rabaey, J., Ammer, J., da Silva, J.L. y Patel, D. 2000. PicoRadio: Ad-hoc Wireless Networking of Ubiquitous Low-Energy Sensor/Monitor Nodes. *University of California at Berkeley*, 39:98–100 p.
- Ruiz, A. 1991. *Caracterización Fenológica del Guayabo*. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Schwartz, M.D. 1999. Advancing to full bloom: Planning phenological research for the 21st century, 1:113–118 p.
- Steiner, A.A. 1984. The universal nutrient solution. *Proceedings 6th International Congress on Soil Culture*, 1084:633–650 p.

- Szewczyk, R., Osterweil, E., Polastre, J., Hamilton, M., Mainwaring, A. y Estrin, D. 2004. Habitat Monitoring with Sensor Networks. *Communications of the ACM*, 47(6):34–40 p.
- Tanenbaum, A.S., Gamage, Chandana y Crispo, Bruno. 2006. Taking Sensor Networks from the Lab to the Jungle. *Vrije Universiteit Amsterdam*, 1–3 p.
- Tavakoli, Arsalan, Dutta, Prabal, Jeong, Jaein, Kim, Sukun, Ortiz, Jorge, Culler, David, Levis, Phillip y Shenker, Scott. 2007. A modular sensor network architecture: past, present, and future directions. *SIGBED Rev*, 4(3):49–54 p.
- Tijerina, L. 1999. Requerimientos Hídricos de Cultivos Bajo Sistemas de Fertirrigación. *TERRA Latinoamericana*, 17(003):237–245 p.
- Torres, E.R. 1995. *Agrometeorología*. Trillas, S.A. de C.V. Primera edición. 154 pp.
- Villalpando, J. y Ruiz, A.C. 1993. *Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura*. Lumusa. Primera edición. 134 pp.
- Volpe, C.A. 1992. Citrus Phenology. *Proceedings of the Second International Seminar on Citrus Physiology*, 1:103–122 p.
- W.M.O. 1993. Practical use of agrometeorological data and information for planning and operational activities in agriculture. *W.M.O.*, 1(60):45 p.

Apéndice A

Acerca de los Grados-Día

La temperatura controla la tasa de desarrollo de muchos organismos. Las plantas y los animales invertebrados, incluidos los insectos y nematodos, requieren una cierta cantidad de calor que se desarrollan a partir de un punto en su ciclo de vida a otro. Esta medida de calor acumulado se conoce como tiempo fisiológico. En teoría, el tiempo fisiológico establece un sistema común de referencia para el desarrollo de organismos. La cantidad de calor necesaria para completar el desarrollo de un determinado organismo no varía, la combinación de la temperatura (entre umbrales) y el tiempo será siempre la misma. El tiempo fisiológico a menudo se expresa en unidades llamadas grados-día ($^{\circ}$ D).

A.1. Umbrales de desarrollo

Los umbrales de desarrollo superiores e inferiores para un determinado organismo son determinados a través de un cuidadoso control de laboratorio y experimentos de campo. Los umbrales varían entre diferentes organismos. El umbral inferior de desarrollo de un organismo es la temperatura por debajo de la cual el desarrollo se detiene. El umbral inferior está determinado por la fisiología del organismo. Es independiente del método utilizado para calcular los grados-día. El umbral superior de desarrollo es la temperatura por encima de la cual la tasa de crecimiento o desarrollo comienza a disminuir o detenerse, este umbral está determinado por el método de cutoff. La interpretación fisiológica del umbral superior depende del método de cutoff utilizado.

A.2. Grado-día

Es la cantidad total de calor necesario, entre los umbrales de crecimiento o desarrollo de un organismo a partir de un punto a otro de su ciclo de vida, se calcula en unidades llamadas grados-día ($^{\circ}\text{D}$). Los grados-día son el producto acumulado del tiempo y temperatura entre los umbrales de desarrollo para cada día. La Figura 30 ilustra la relación entre el tiempo, temperatura y la acumulación de grados-días. Un grado-día es la temperatura en un día (24 horas) por encima del umbral de desarrollo inferior en un grado.

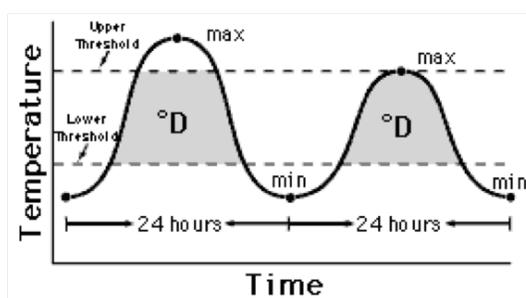


Figura 30: Umbrales y acumulación de grados-día

Un grado Celsius (DDC) día no es lo mismo que un grado Fahrenheit día (DDF) debido a que un grado Fahrenheit es más pequeño que un grado Celsius. Nueve Fahrenheit grados-día son necesarios para hacer cinco Celsius grados-día. $\text{DDC} = 5 / 9 (\text{DDF})$ y $\text{DDF} = 9 / 5 (\text{DDC})$. La Figura 31 muestra que las zonas que están bajo la curva de temperatura representada en Celsius y Fahrenheit unidades son iguales, pero difieren las unidades.

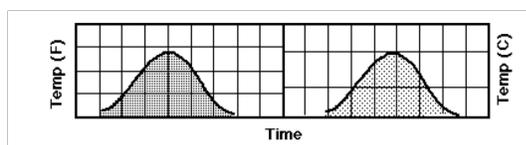


Figura 31: La acumulación de grados-día representados en unidades Fahrenheit y Celsius

Cada etapa de desarrollo de un organismo tiene su propia exigencia total de calor. El desarrollo puede ser estimado por la acumulación de grados-día entre los umbrales de temperatura durante toda la temporada. Cada especie requiere un determinado número de grados-días para completar su desarrollo. La acumulación de días grado desde un punto

de partida puede ayudar a predecir cuando una etapa de desarrollo se alcanzará. La fecha para que comience a acumular grados-día es conocida como el biofix, dicha fecha varía con la especie. Las fechas biofix se basan generalmente en procesos biológicos específicos tales como las fechas de plantación, en. La acumulación de grados-día debe hacerse con regularidad, especialmente cuando es necesario tomar decisiones en base a medidas de control.

A.3. Métodos para calcular los Grados-Día

Existen varios métodos para estimar los grados-día mediante el uso de las temperaturas máximas y mínimas, sin embargo todos son aproximaciones del número real de los grados-día acumulados para un determinado conjunto de temperaturas diarias y umbrales de desarrollo, por tanto, no proporcionan valores exactos. Aun así, la mayoría de los métodos son adecuados teniendo en cuenta la exactitud del tiempo, los instrumentos utilizados y la precisión necesaria para apoyar a la toma de decisiones en el manejo de cultivos. Los métodos para cálculo el calculo de los grados-día difieren un poco en complejidad. Además la temporada del año y la región climática causan que estos métodos varíen en la forma en que reflejan con exactitud el grado real de días. El calculo de los grados-día se basa en el área bajo la curva de la temperatura entre los umbrales. La mayoría de los métodos son lineales ya que se presume que la función de desarrollo es una línea recta directamente relacionada con la temperatura.

A.3.1. Métodos del Triángulo

La Figura 32 ilustra el método del triángulo simple. En este método se dibuja una línea recta entre las temperaturas mínima y máxima de un día, se asume que al día siguiente la temperatura mínima es la misma que el día anterior y señala otra línea a ese punto, formando los dos lados de un triángulo. Este método supone que la curva de la temperatura es simétrica en torno a la temperatura máxima. Los grados-día se obtienen mediante el cálculo del área dentro del triángulo, entre los umbrales.

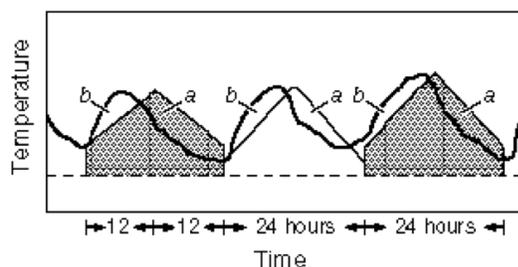


Figura 32: El método del triángulo simple para grados-día acumulados

El método del triángulo doble se ilustra en la Figura 33. En dicho método se divide el día en dos periodos de 12 horas, en el doble triángulo se dibuja una línea recta entre las temperaturas mínima y máxima diarias, y otra línea vertical a través de la temperatura máxima, formando dos lados de un triángulo. Los grados-día se obtienen mediante el cálculo del área dentro del triángulo, entre los umbrales. El grado-día para el segundo periodo de 12 horas se calcula de forma similar, pero utilizando como temperatura mínima la del día siguiente. El grado-día viene dado por la suma de los grados-día para las dos mitades del día.

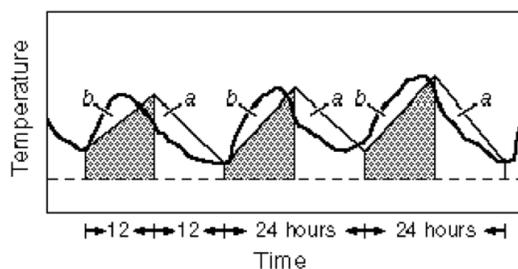


Figura 33: El método del doble triángulo para grados-día acumulados

A.3.2. Métodos del Seno

Figura 34 ilustra el método del seno simple. Esta técnica utiliza las temperaturas mínimas y máximas del día, para producir una condición curva durante un período de 24 horas, el grado-día para ese día se obtiene mediante el cálculo del área por encima del umbral y por debajo de la curva. Este método asume que la temperatura curva es simétrica en torno

a la temperatura máxima.

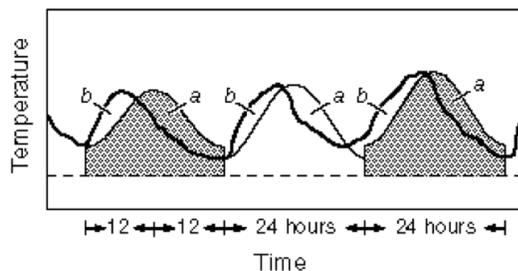


Figura 34: El método del seno simple para grados-día acumulados

La Figura 35 ilustra el método del seno doble . Este método se adapta a una condición curva dada por las temperaturas mínima y máxima del día, posteriormente se ajusta por separado la curva seno de la temperatura máxima del día a la temperatura mínima del día siguiente. El grado-día de la fecha se obtiene de la suma de los grados-día para las dos mitades del día.

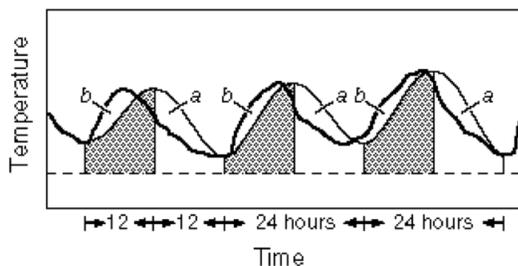


Figura 35: El método del seno doble para grados-día acumulados

A.3.3. El método de Huber

Huber produce el mismo resultado que el método del seno simple con cutoff horizontal, excepto que es necesario restar 0.3 grados-día Fahrenheit a la acumulación de grados del día, si la temperatura mínima y máxima para ese día están entre los umbrales superior e inferior.

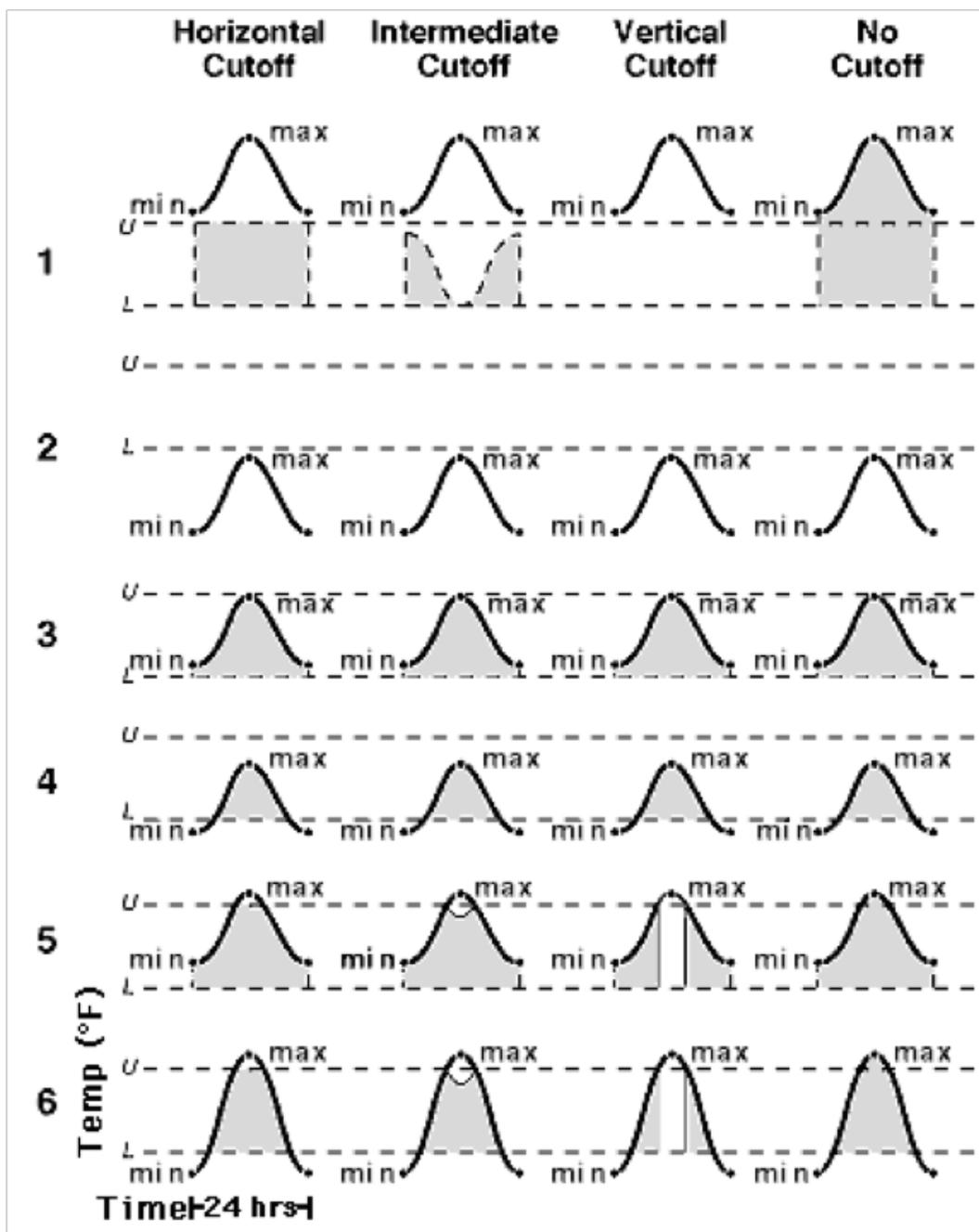


Figura 36: Seis posibles relaciones pueden existir entre la temperatura diaria, y los umbrales superior e inferior

A.3.4. Métodos de cutoff

El método de cutoff se refiere a la forma en que el cálculo de los grados-día se modificará con relación al umbral superior. El método de cutoff proporciona una selección de tres métodos cutoff: horizontal, vertical, e intermedio para ser utilizados en conjunto con los métodos de triángulo y seno. La Figura 36 ilustra las modificaciones de cada método de cutoff.

A.3.5. Método de cutoff horizontal

Supone que el desarrollo continúa a una velocidad constante a temperaturas por encima de la parte superior del umbral. Matemáticamente, el área por encima del umbral superior se resta de la zona por encima del umbral inferior.

A.3.6. Método de cutoff intermedio

Cutoff intermedio asume que el desarrollo se frena, pero no se detiene, a temperaturas por encima del umbral superior. Matemáticamente, al área por encima del umbral superior se resta el doble de la zona por encima del umbral inferior.

A.3.7. Método de cutoff vertical

El método de cutoff vertical supone que el desarrollo no se produce cuando la temperatura está por encima del umbral superior.

Apéndice B

Acerca de las Soluciones Nutritivas

La solución nutritiva es otro de los componentes básicos de la hidroponía y del fertirriego. Su principal función es abastecer de nutrimentos minerales a las plantas en: la forma química, la concentración iónica y la relación mutua de iones que permita la máxima toma de iones por el cultivo.

B.1. Soluciones nutritivas balanceadas

Existen varias formas de elaborar soluciones nutritivas, para el caso del fertirriego basta con mezclar todos los componentes nutritivos en agua y elaborar una solución para regar. Entre las principales características que debe poseer se encuentran: el pH, la conductividad eléctrica, la presión osmótica, y la relación mutua de aniones y cationes.

B.1.1. pH

El pH tiene un efecto determinante en la solución nutritiva, ya que determina la forma química de los iones en el agua. Entre los nutrimentos que más afecta se encuentran: los carbonatos, los fosfatos, el hierro y el manganeso.

El pH óptimo de una solución nutritiva se define en función a la disponibilidad nutricional. El pH óptimo es aquel en el cual los iones se encuentran en una forma química que permite la máxima toma de iones por la planta, en termino numéricos se encuentra entre 5.5 y 6.2.

B.1.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es una evaluación indirecta del contenido de sales de una solución nutritiva o de la solución del suelo. Se mide en unidades como: «DeciSiemens/m» o «Mmhos./cm». Puede verse además como una medida de la concentración total de sales de una solución, por lo que no se conocen los iones que se encuentran en solución y la concentración de cada uno de ellos. La conductividad eléctrica afecta directamente en el rendimiento del cultivo, así como en la calidad de los frutos por lo que su correcto manejo es de vital importancia. En términos matemáticos se define como:

$$9,819CE - 1,462 = \sum_{i=1}^n \text{ de cationes} = \sum_{i=1}^m \text{ de aniones en meq } l^{-1}$$

La solución real de una solución puede ser diferente a la calculada si la cantidad de iones y la concentración de los mismos es alta. La concentración de nutrimentos en una solución debe estar relacionada con la absorción iónica diferencial y con la demanda del cultivo.

B.1.3. Cálculo de una solución nutritiva

El procedimiento para calcular una solución nutritiva consiste en lo siguiente, de manera inicial hay que contar con los resultados del análisis del agua con la que se va a preparar dicha solución nutritiva. El siguiente paso consiste en definir la conductividad eléctrica que debe tener la solución nutritiva deseada, para posteriormente calcular la concentración total de sales de la solución. Por otra parte es necesario calcular la concentración teórica de los aniones y los cationes. Para el caso de los aniones la proporción mutua propuesta por Steiner es: 60:5:35, en el caso de los cationes la proporción mutua propuesta por Steiner es de: 40:35:25 (véase Figura 37).

Una vez que se ha calculado la concentración teórica, es necesario restarle de la concentración teórica de aniones y cationes la concentración de los mismos presentes en el agua de riego, para calcular la concentración real de aniones y cationes que debe llevar la

solución nutritiva.

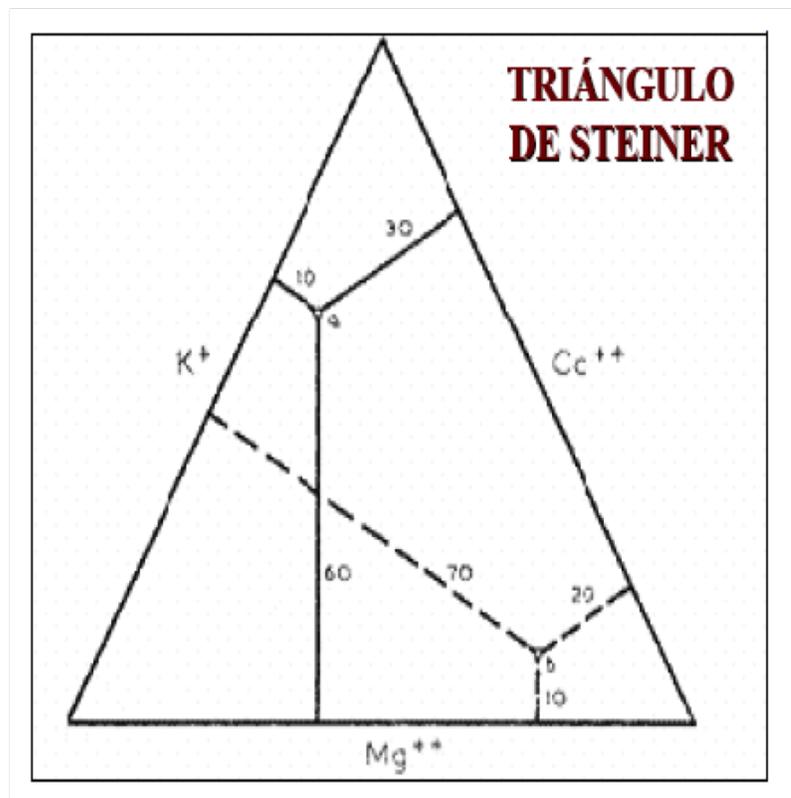


Figura 37: **Triángulo de Steiner**

El cálculo de la cantidad de fertilizante a utilizar viene dado de acuerdo a los fertilizantes disponibles, la cantidad de solución a preparar y los pesos de los fertilizantes necesarios para obtener la composición deseada.

B.1.4. Cálculo de una solución nutritiva balanceada

En esta sección se presenta el cálculo de una solución nutritiva para un cultivo de tomate en etapa de floración con tezontle como sustrato. La conductividad eléctrica recomendada para este cultivo en la etapa fenológica mencionada es e 2.35. Se cuenta con la información de un análisis de agua, tal como se muestra en la Figura 38.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UNA SOLUCIÓN ...

1. Análisis del Agua de Riego

Aniones meq l ⁻¹		Cationes meq l ⁻¹	
Nitrato	1.23	Calcio	6.25
Fosfato	0.35	Magnesio	2.36
Sulfato	2.24	Potasio	0.78
Carbonatos	0.00	Sodio	2.54
Bicarbonatos	6.50		
Cloruros	1.56		
Suma	11.88	Suma	11.93
CE, dS m⁻¹	1.21	pH	7.25

Figura 38: Resultados de un análisis de agua

En las Figuras 39 y 40 se presenta el cálculo de la concentración de los aniones y cationes según la proporción de Steiner.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UNA SOLUCIÓN

4. Cálculo de concentración de aniones

Aniones	Conc.	% Steiner	meq l ⁻¹
Nitratos	23.5	X 0.60 =	14.1
Fosfatos	23.5	X 0.05 =	1.2
Sulfatos	23.5	X 0.35 =	8.2

Figura 39: Concentración calculada de aniones

Para el cálculo de la concentración de aniones y cationes es necesario tomar en cuenta la conductividad eléctrica y las proporciones definidas en el triángulo de Steiner.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UNA SOLUCIÓN ...

5. Cálculo de concentración de cationes

Cationes	Conc.	% Steiner	meq l ⁻¹
Calcio	23.5	X 0.40	= 9.4
Potasio	23.5	X 0.35	= 8.2
Magnesio	23.5	X 0.25	= 5.8

Figura 40: Concentración calculada de cationes

Ya obtenidos los valores de la concentración calculada, es necesario calcular la concentración real de aniones y cationes, para ello es necesario considerar la concentración calculada y el aporte registrado en el análisis del agua de riego.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UNA SOLUCIÓN ...

6. Cálculo de concentraciones reales de aniones

Aniones	meq l ⁻¹	Agua	Aporte
Nitratos	14.1	- 1.25	= 12.87
Fosfatos	1.2	- 0.35	= 0.82
Sulfatos	8.2	- 2.24	= 5.98

Figura 41: Concentración real de aniones

Las Figuras 41 y 42 presentan los cálculos de las concentraciones reales de aniones y cationes.

EJEMPLO DE CÁLCULO DE UNA SOLUCIÓN ...

6. Cálculo de concentraciones reales de Cationes

Cationes	meq l ⁻¹		Agua		Aporte
Calcio	9.4	-	6.25	=	3.15
Potasio	8.2	-	0.78	=	7.44
Magnesio	5.8	-	2.36	=	3.51

Figura 42: Concentración real de cationes

Una vez que se ha calculado la concentración real de aniones y cationes, es posible calcular la cantidad de fertilizante requerido. en la Figura 43 se presenta el cálculo de los fertilizantes requeridos para el tomate.

7. Cálculo de fertilizantes requeridos

Fertilizante	meq l ⁻¹		meq a mg (peq)		mg a g		g l ⁻¹ o kg m ⁻³
KNO₃	7.4	X	101.0	X	1000	=	0.747
Ca(NO₃)₂	3.1	X	118.0	X	1000	=	0.366
Mg(NO₃)₂	1.5	X	128.2	X	1000	=	0.192
NH₄NO₃	1	X	80.0	X	1000	=	0.080
MgSO₄	2	X	123.0	X	1000	=	0.246

Figura 43: Resultados de un análisis de agua

En la Figura 44 se presenta la formula utilizada para el cálculo de los fertilizantes, dicha formula toma en consideración aspectos como la riqueza y densidad del fertilizante.

7. Cálculo de fertilizantes requeridos

Densidad (ρ) = 1.6
 Riqueza (r) = 71.8%
 Peq = 98
 meq requeridos = 1.5

H₃PO₄

Cantidad a agregar = $\frac{\text{meq requeridos} \times \text{peq} \times (1/\rho) \times (100/r)}{1000}$

Cantidad a agregar = $\frac{1.5 \times 98 \times (1/1.6) \times (100/71.8)}{1000}$

Cantidad a agregar = 0.012 ml l⁻¹

Figura 44: Resultados de un análisis de agua

Una vez aplicada la formula para cada uno de los fertilizantes disponibles para la solución, se obtienen resultados similares a los presentados en la Tabla VI.

Fertilizante	Cantidad (g)
Nitrato de potasio	747
Sulfato de magnesio	246
Nitrato de calcio	366
Acido fosfórico	102
Nitrato de magnesio	192

Tabla VI: Resultados del calculo de la solución nutritiva

Apéndice C

Formatos y Tablas

C.1. Tabla de Métricas Para Interpretación del Análisis de Agua

		SIN PROBLEMA	PROBLEMA CRECIENTE	PROBLEMA GRAVE
Salinidad (Cea en dS/m)		< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
Infiltración RAS	0-3 y CEa	0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	3-6	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
	6-12	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	12 – 20	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	20 – 40	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Toxicidad iónica específica				
Sodio mE/L	Riego por superficie	< 3.0	3.0-9.0	> 9.0
	Riego por aspersión	< 3.0	> 3.0	
Cloruros mE/L	Riego por superficie	< 4.0	4.0 – 10.0	> 10.0
	Riego por aspersión	< 3.0	> 3.0	
Boro mg/L		< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
Efectos diversos:	Nitrógeno mg/L	< 5.0	5.0 – 30.0	> 30.0
	Bicarbonatos mE/L	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
pH		Rango normal: 6.5 a 8.4		

C.2. Tabla de Métricas Para Interpretación del Análisis de Suelo

ELEMENTO SUELO	MÉTODO EXTRACCIÓN	UNIDAD	RIQUEZA DEL SUELO			
			BAJA	MEDIO	ALTA	
N	kjeldahl	%	< 0,10	0,1	> 0,2	
P OLSEN	bicarbonato sódico	mg/kg	< 10	10-30	> 30	
K	Acetato amonio	mg/kg	< 190	200	> 300	
Ca	Acetato amonio	mg/kg	< 2.000	3000	> 4.000	
Mg	Acetato amonio	mg/kg	< 300	300-600	> 600	
Na	Acetato amonio	mg/kg	50		200	
B	agua caliente	mg/kg	< 0,5	1	> 2	
Fe	DTPA	mg/kg	< 100	100-400	> 400	
Mn	DTPA	mg/kg	< 10	10-20	> 20	
Cu	DTPA	mg/kg	< 1		> 10	
Zn	DTPA	mg/kg	< 3		> 20	
Al	CINa	mg/kg	10		100	
AZUFRE	CICa	%	0,05	0,1	0,15	
MATERIA ORGÁNICA	Arcilla %	< 10	%	< 1,75	1,75	> 2,5
		10-30	%	< 2	2	> 3
		> 30	%	< 2,5	2,5	> 3,5
RELACIÓN C/N	calculo	s/u	< 8	9	> 13	
CALIZA ACTIVA	volumetría	% PESO	< 5	10	> 10	
CALIZA TOTAL	volumetría	% PESO	< 15	20-30	> 35	
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	1: 5	mS/cm	< 0,1	0,4-0,7	> 1	
	extracto pasta saturada	mS/cm	< 1	1-3	> 4	
C.I.C.	Acetato sodio	meq/100g	< 10	20	> 30	
RESERVA DE AGUA	arcilla + limo	%	< 25		> 40	
SATURACIÓN POR BASES	bases / CIC	%	< 50	60-80	> 90	
SALINIDAD POR Na	Na / CIC	%	< 6	10	> 15	
SATURACION POR K	K/CIC	%	< 3	5	> 6	
SATURACION POR Mg	Mg/CIC	%	< 10	10	> 15	
SATURACION POR Ca	Ca/CIC	%	< 50	60	>70	
pH	Relación 1:2	Und. De pH	< 5,5	7-8	> 8,5	
	Se realiza también medición en KCl en suelos, pues en esta solución se evitan las interferencias producidas por los abonos, pesticidas, etc, siendo un valor mucho más próximo a como se comporta realmente la solución en el suelo.					
HIDROCARBUROS TOTALES DEL PETROLEO	Disolventes orgánicos	mg/kg	< 5.000			

C.3. Formato de Análisis de Agua y Suelo (Hoja 1)

	INSTITUTO DE CIENCIAS AGRICOLAS LABORATORIO DE AGUA Y SUELO FORMATO DE REPORTE		Página 1#8
	Formato: REP 002	Versión: 1.1	Fecha: 01-01-05
	Título: Reporte de Análisis de Suelo		

Nombre:	SUELO NORMAL		
Localización:		Lote No.	
Número de control:		Clave:	Profundidad:

ANALISIS	DETERMINACIÓN	RESULTADOS	
	Porcentaje de saturación (%)	36.79	
	Conductividad eléctrica (dS/m)	0.780	
	Potencial de Hidrogeno (pH)	8.07	
	Aniones y Cationes	mE/L	ppm
	Calcio (Ca ⁺⁺)	6.18	
	Magnesio (Mg ⁺⁺)	1.60	
	Sodio (Na ⁺)	1.54	
	Potasio (K ⁺)	0.20	
		mE/L	ppm
SALINIDAD	Carbonatos (CO ₃ ²⁻)		
	Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)		
	Cloruros (Cl ⁻)	1.67	
	Sulfatos (SO ₄ ²⁻)		
	Indicadores		
	Sólidos disueltos totales (ppm)		
	Relación de adsorción de sodio	0.78	
	Porcentaje de sodio Intercambiable (%)		
	Clasificación		
	Nitrógeno (kg/ha)		
	Fósforo (kg/ha)		
FERTILIDAD	Potasio (kg/ha)		
	Materia Orgánica (%)		
	Capacidad de Intercambio Catiónico mE/100 g suelo	10.40	
	Constantes de Humedad		
	Capacidad de Campo (%)		
	Punto de Marchitez Permanente (%)		
	Contenido de humedad del suelo (%)		
ANALISIS FISICOS	Densidad Aparente (g/cm ³)		
	Textura		
	Granulometría		Clasificación
	Arena	Limo	Arcilla

<i>Supervisor Técnico</i>		<i>Coord. de Laboratorio Supervisor Calidad</i>
Tec. Jesús F. Tuells Noriega		Dr. Jesús A. Román Calleros

C.4. Formato de Análisis de Agua y Suelo (Hoja 2)

	INSTITUTO DE CIENCIAS AGRICOLAS LABORATORIO DE AGUA Y SUELO FORMATO DE REPORTE		Pagina 2#8
	Formato: REP 002	Versión: 1.1	Fecha: 01-01-05
	Título: Reporte de Análisis de Suelo		

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC) TIPICO EN SUELO NORMAL:

Elemento	Cationes de Cambio	
	mE/100 g suelo	%
Na	0.43	4.13
K	0.37	3.55
Ca	7.49	72.02
Mg	2.11	20.29
CIC	10.40	

Apéndice D

Manual de Usuario

En esta sección se presenta la información necesaria para utilizar el sistema de monitoreo para cultivos protegidos. De esta forma se pretende guiar al usuario en el uso adecuado del sistema, de manera que pueda aprovechar todas las herramientas que se proveen. Se presenta además una descripción de los elementos necesarios para la instalación del sistema, así como las características necesarias para el equipo en que se pretende alojar.

D.1. Requerimientos mínimos

Los requerimientos mínimos del equipo de cómputo, para la instalación del sistema se presentan a continuación:

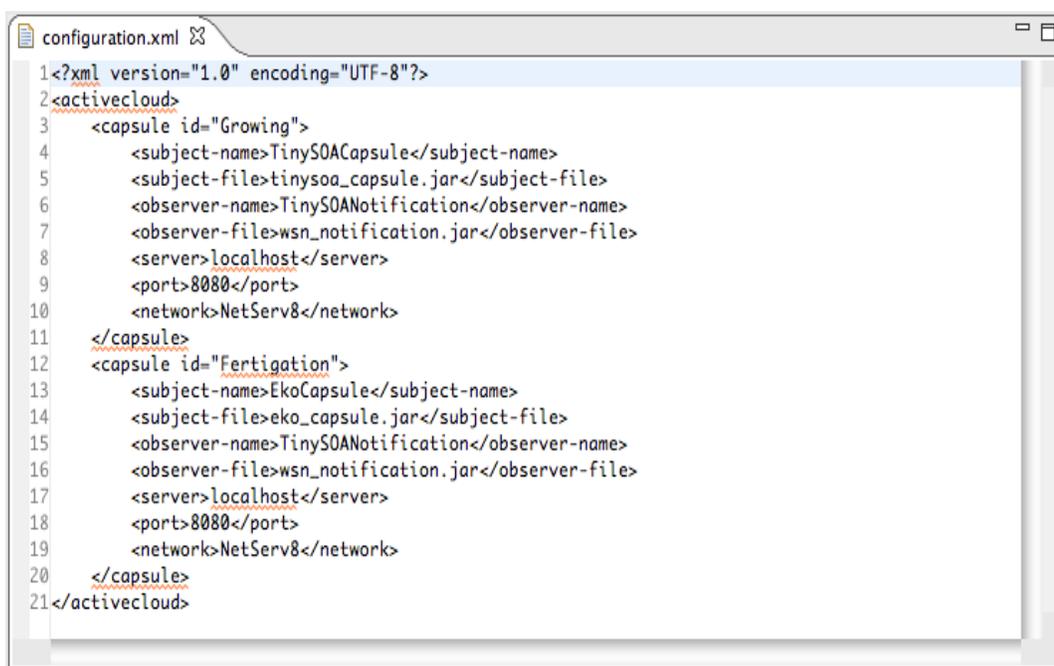
- Plataforma: Linux, Mac OS X, Windows
- Procesador Intel Pentium IV o superior
- Memoria RAM de 512 MB
- 500 MB de Espacio Libre en el Disco Duro
- Monitor VGA de 14.º superior
- Java JRE 6

D.2. Instalación

Para el proceso de instalación del sistema, lo primero que se necesita es tener instalado la versión 6 del JRE de java. En este momento es necesario copiar la carpeta «plugins» en

el directorio donde se quiere instalar el sistema. Posteriormente se copias las cápsulas sujeto y observador correspondientes a cada una de las redes de sensores a las que se quiera acceder, en el directorio «plugins/lib».

Para iniciar el funcionamiento del sistema lo único que resta es configurar la información sobre las cápsulas agregadas al sistema, por lo que que es necesario acceder al archivo «configuracion.xml» ubicado en el directorio «plugis/data/org.jpjf.pluginmanager».



```
1<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2<activecloud>
3  <capsule id="Growing">
4    <subject-name>TinySOACapsule</subject-name>
5    <subject-file>tinysoa_capsule.jar</subject-file>
6    <observer-name>TinySOANotification</observer-name>
7    <observer-file>wsn_notification.jar</observer-file>
8    <server>localhost</server>
9    <port>8080</port>
10   <network>NetServ8</network>
11  </capsule>
12  <capsule id="Fertigation">
13    <subject-name>EkoCapsule</subject-name>
14    <subject-file>eko_capsule.jar</subject-file>
15    <observer-name>TinySOANotification</observer-name>
16    <observer-file>wsn_notification.jar</observer-file>
17    <server>localhost</server>
18    <port>8080</port>
19    <network>NetServ8</network>
20  </capsule>
21</activecloud>
```

Figura 45: Archivo de configuración del sistema

En la Figura 45 se muestra la estructura del archivo «configuracion.xml» en el cual es necesario definir: el nombre con el que el sistema identificara de las cápsulas sujeto y observador, el nombre físico de las cápsulas, el host donde se encuentra ubicada la red, el puerto a través del cual se comunica la red al exterior y el nombre de la red de sensores. En este momento el sistema se encuentra completamente instalado.

D.3. Ejecución

Una vez que el sistema ha sido instalado en la computadora, puede ejecutarse haciendo doble clic sobre el archivo «run.sh», para el caso de OSX y Linux y «run.bat» en windows. Dicho archivo se encuentra en la raíz del directorio «plugins».

D.4. Operación del sistema

Una vez que se ha ejecutado el sistema es posible visualizar una interfaz gráfica con dos pestañas. La primera pestaña corresponde al plugin de crecimiento y la segunda al plugin de fertirrigación, la funcionalidad de dichos plugins se describe a continuación.

D.4.1. Plugin de crecimiento

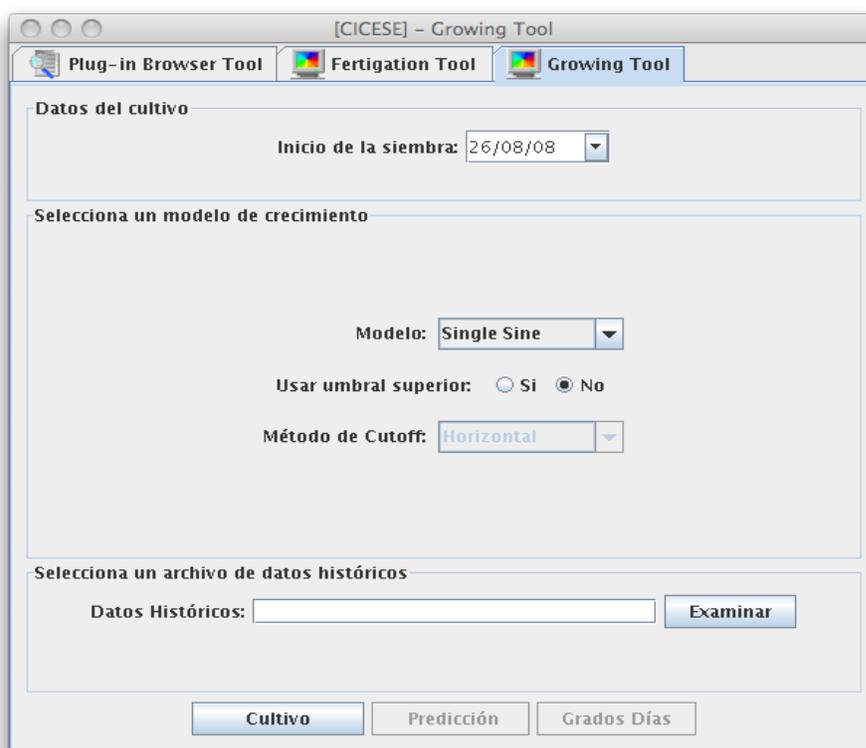


Figura 46: Captura de la pantalla principal del plugin de crecimiento

Una vez que se ha concluido el proceso de instalación y se ha ejecutado el sistema, es posible iniciar a explorar sus funcionalidades. La pestaña de crecimiento, brinda una predicción sobre el tiempo de crecimiento de un cultivo en base a la cantidad de calor que acumula día a día (véase Apéndice A). En la Figura 46 se visualiza la pantalla principal del plugin de crecimiento. Para realizar una predicción es necesario seguir los siguientes pasos.

The screenshot shows a window titled "Genotipo" with the following fields and controls:

- Cultivo:** Maiz (dropdown menu)
- Nombre del Cultivo:** Maiz (text input)
- Nombre del Genotipo:** A-791 (text input)
- Nombre de la red:** NetServ8 (text input)
- Umbral Superior:** 60 (text input)
- Umbral Inferior:** 4 (text input)
- Etapas Fenológicas:**
 - Seasonal tabs: Primavera, Verano, Otoño, Invierno
 - Table with columns: Stage Name, Degree Days, Duration
- Buttons: +, -
- Radio buttons: Sobrescribir Existente: Si No
- Bottom buttons: Cargar, Guardar, Nuevo, Borrar

Stage Name	Degree Days	Duration
EF1	260	1
EF2	580	5
EF3	720	23
EF4	896	6
EF5	1565	10

Figura 47: Captura de pantalla de la ventana de selección de cultivos

Para realizar una predicción lo que primero que es necesario realizar, es definir el cultivo sobre el cual se quiere conocer la información. Para ello es necesario presionar sobre el botón de «Cultivo», enseguida se despliega una ventana similar a la que se presenta en la Figura 47.

Si es la primera vez que se ingresa a esta sección, es necesario dar de alta la información correspondiente del cultivo. Para ello es necesario presionar el botón «Nuevo», enseguida

es necesario llenar toda la información que se solicita en el formulario. Las pestañas con los nombres de las estaciones del año permiten definir diferentes periodos de crecimiento de la planta, según la fecha del año en la que se inicie la siembra.

Una vez que se han completado el llenado de los campos del formulario basta con presionar el botón «Guardar» para almacenar la información que se ha introducido, en caso de que exista un cultivo dado de alta con un nombre similar, el sistema preguntará si desea sobrescribir los datos existentes o cambiar el nombre del nuevo cultivo. Una vez agregado el nuevo cultivo basta con presionar el botón «Cargar» para que la información de ese cultivo seleccionado sea utilizada para la realización de la predicción.

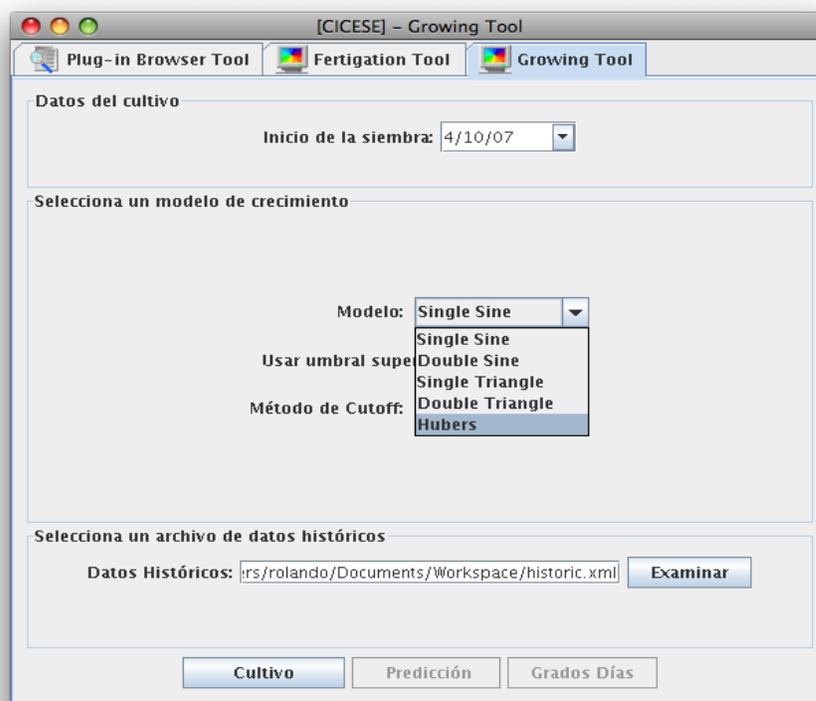


Figura 48: Captura de pantalla que representa la selección del método del estimación de los grados-días

Una vez que se ha seleccionado el tipo de cultivo con el cual se realizará la predicción,

es necesario definir el método para estimar los grados-días. Para más información consulte el Apéndice A. La selección del método depende de la preferencia del usuario (véase Figura 48).

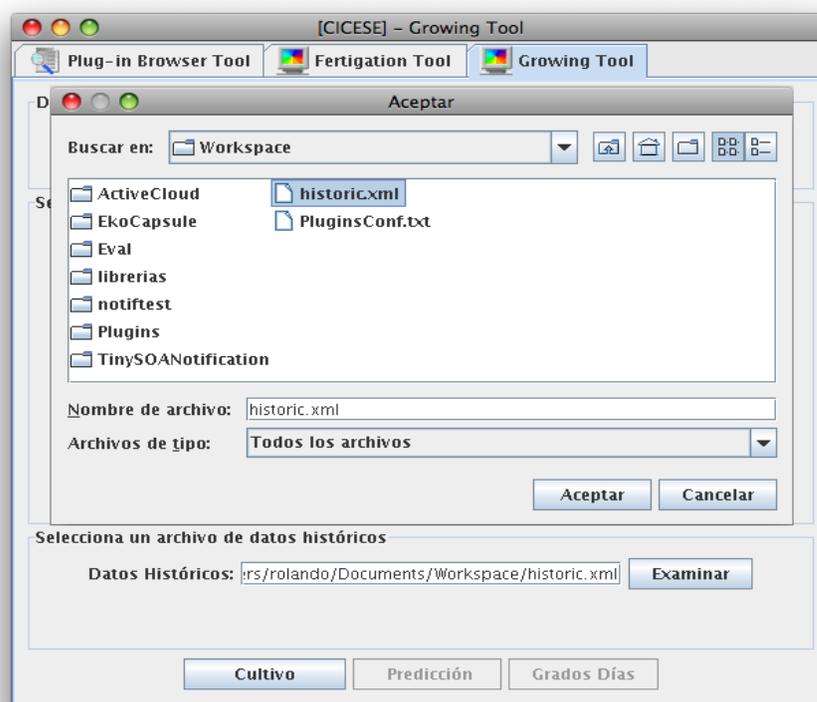


Figura 49: Captura de pantalla que representa la selección de un archivo de datos histórico

Ya definido el método para el cálculo de los grados-días, es necesario seleccionar un archivo que contenga información histórica sobre máximos y mínimos de temperatura, de la región en la cual se pretende realizar la predicción, tal como se muestra en la Figura 49. Dicha información es necesaria para realizar la predicción del crecimiento. Es de suma importancia que la información histórica corresponda exactamente a la región donde se pretenda utilizar, ya que esta influye directamente en los resultados de la predicción.

La Figura 50 presenta el formato «XML» propuesto para definir un archivo de datos

históricos compatible con el sistema. Como es posible observar, la información está organizada por años, meses y días. Si no se cuenta con la información completa de algún año en particular, se recomienda llenar la información de las temperaturas faltantes con ceros.

Figura 50: Contenido del archivo de datos históricos

Cuando se ha seleccionado un tipo de cultivo, un método de cálculo de grados-días y un archivo de datos históricos, es posible realizar la estimación del crecimiento del cultivo previamente seleccionado, además es posible visualizar un registro de los grados-días acumulados desde el inicio de la siembra del cultivo.

Cuando el botón de «Predicción» es presionado se visualiza una imagen similar a la que se presenta en la Figura 51, en dicha imagen se presenta la información correspondiente a los grados-días registrados por el sistema y la información de cada una de las etapas fenológicas con los valores brindados por la predicción.

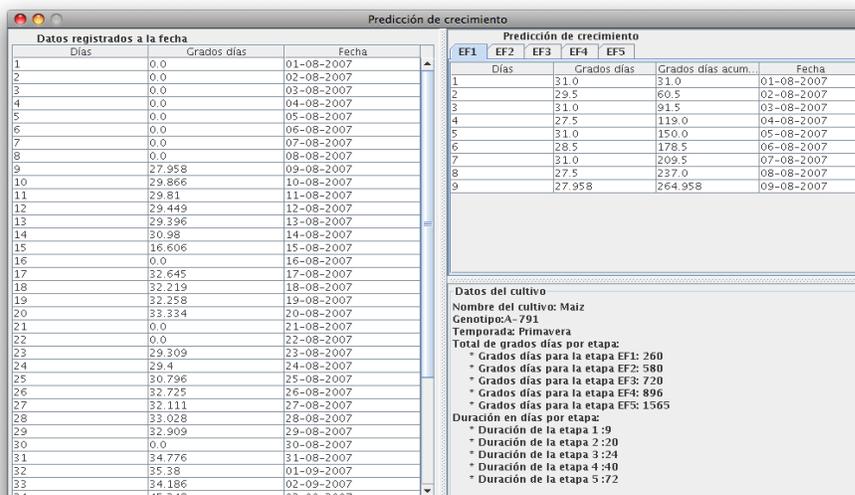


Figura 51: Captura de pantalla de la ventana de predicción de crecimiento

La Figura 52 presenta el registro de los grados-días acumulados por el cultivo desde el inicio de la siembra.

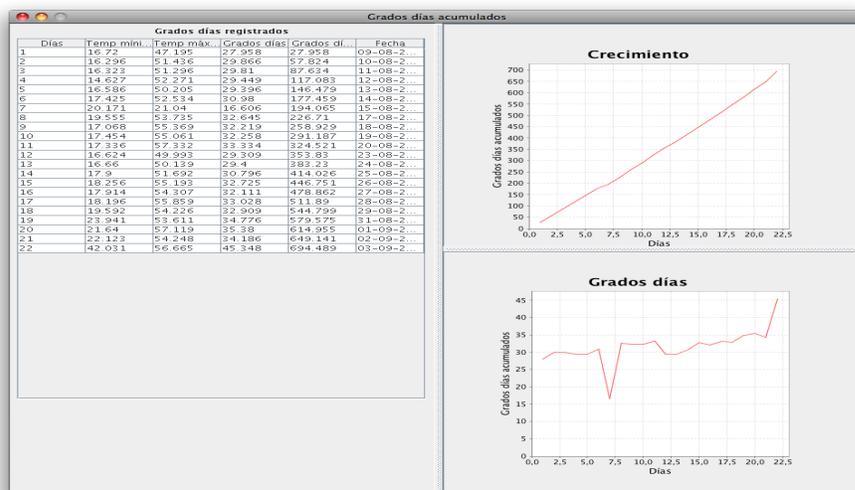


Figura 52: Captura de pantalla de la ventana de registro de grados-días acumulados

D.4.2. Plugin de fertirrigación

La función del plugin de fertirrigación viene dada por el cálculo de la cantidad de nutrientes necesarios por el cultivo, en una solución de agua suficiente para completar el proceso de riego. Para el cálculo de los nutrientes requeridos por el cultivo es necesario tomar en cuenta la relación entre la planta, suelo y el agua (véase la Sección II.4). La Figura 53 presenta la ventana principal del plugin de fertirrigación.

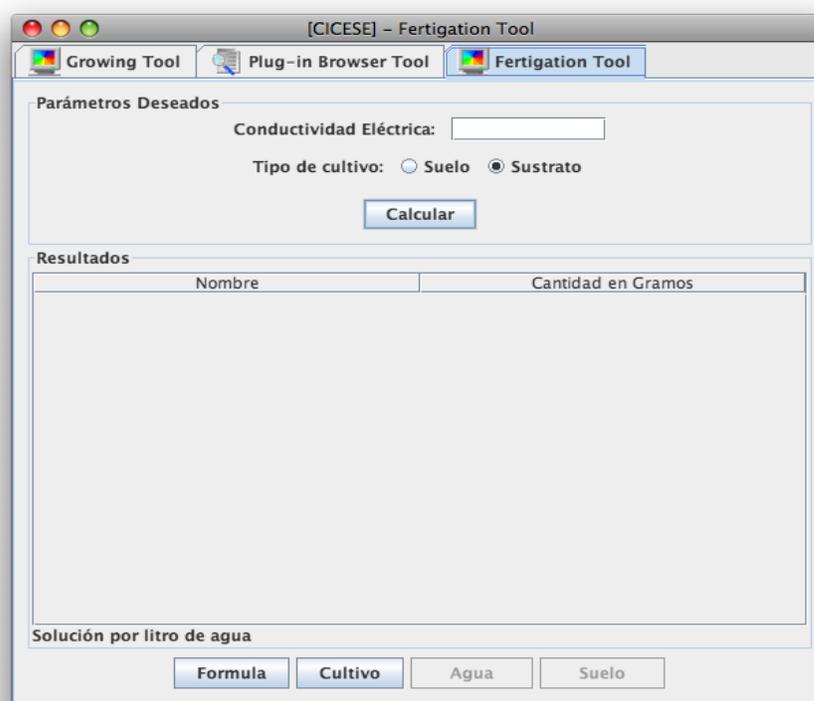


Figura 53: Captura de pantalla de la ventana de fertirrigación

Para iniciar el cálculo de la cantidad de nutrientes necesarias del cultivo, es necesario seguir un conjunto de pasos que serán detallados más adelante en esta sección. Sin embargo el cálculo de la solución nutritiva es fundamental para el éxito en la nutrición del cultivo. Los fertilizantes que conforman la solución nutritiva dependen del tipo de cultivo y la etapa fenológica.

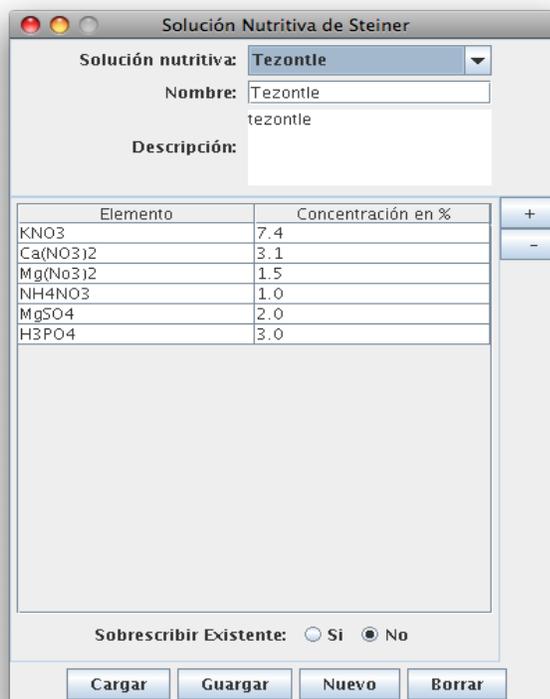
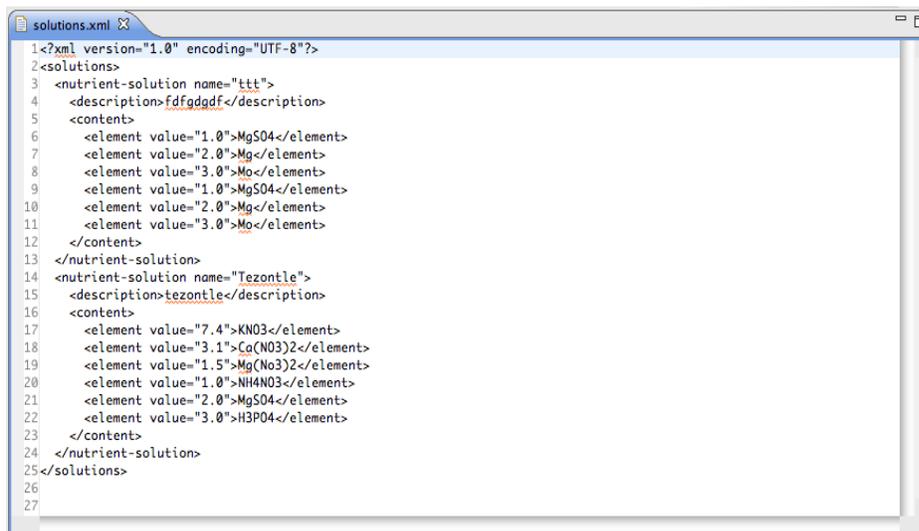


Figura 54: **Captura de pantalla de la ventana de solución nutritiva**

Para gestionar una solución nutritiva basta con presionar el botón «Formula», mediante el cual se despliega una ventana similar a la mostrada en la Figura 54. En esta ventana es posible agregar nuevas soluciones nutritivas o seleccionar alguna para trabajar con ésta.

Para agregar una nueva solución nutritiva basta con presionar el botón «Nuevo» y llenar los campos correspondientes. La Figura 55 presenta el archivo «XML» que representa el formato donde se almacenan las soluciones nutritivas. Como es posible observar en la figura, cada solución nutritiva está relacionada con un conjunto de fertilizantes, cada fertilizante posee un registro de sus propiedades y elementos que lo componen, para almacenar dicha información se diseñó una plantilla basada en «XML», dicha plantilla es similar a la presentada en la Figura 56. Dicho archivo se almacena el directorio «plugins/data/org.jpff.fertigation».

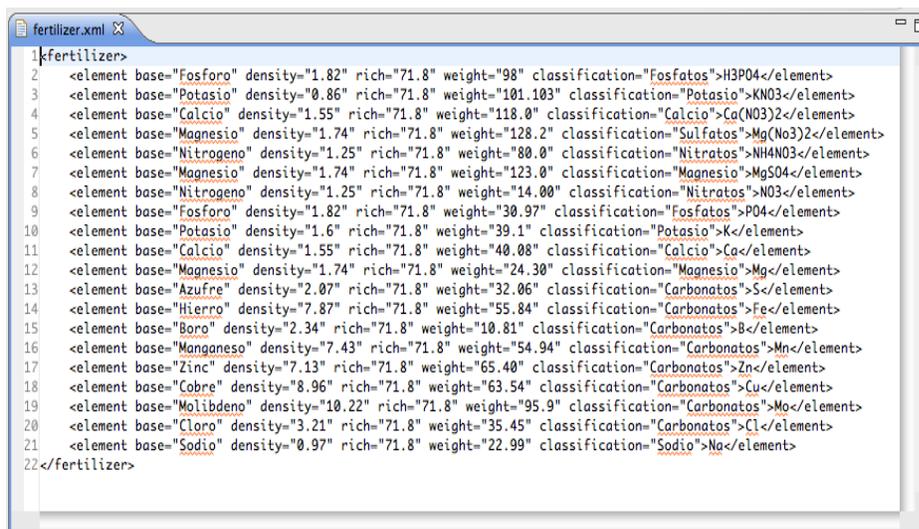


```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <solutions>
3   <nutrient-solution name="ttt">
4     <description>fdfgdgd</description>
5     <content>
6       <element value="1.0">MgSO4</element>
7       <element value="2.0">Mg</element>
8       <element value="3.0">Mo</element>
9       <element value="1.0">MgSO4</element>
10      <element value="2.0">Mg</element>
11      <element value="3.0">Mo</element>
12    </content>
13  </nutrient-solution>
14  <nutrient-solution name="Tezontle">
15    <description>tezontle</description>
16    <content>
17      <element value="7.4">KNO3</element>
18      <element value="3.1">Ca(NO3)2</element>
19      <element value="1.5">Mg(NO3)2</element>
20      <element value="1.0">NH4NO3</element>
21      <element value="2.0">MgSO4</element>
22      <element value="3.0">H3PO4</element>
23    </content>
24  </nutrient-solution>
25 </solutions>
26
27

```

Figura 55: Archivo XML donde se almacenan las soluciones nutritivas



```

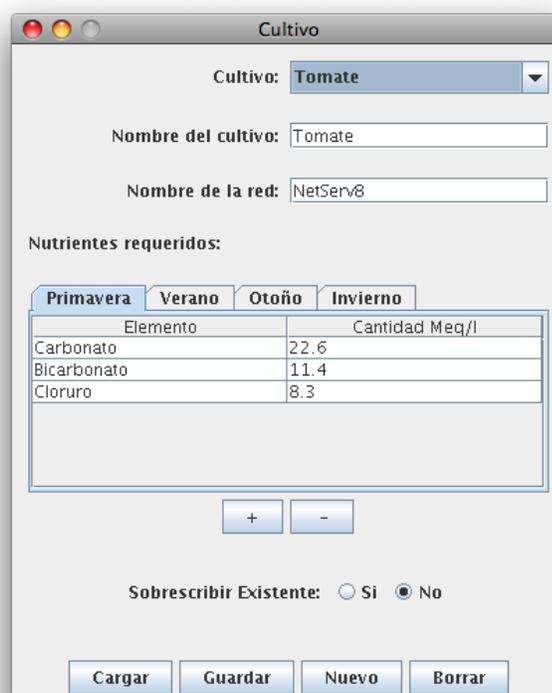
1 <fertilizer>
2   <element base="Fosforo" density="1.82" rich="71.8" weight="98" classification="Fosfatos">H3PO4</element>
3   <element base="Potasio" density="0.86" rich="71.8" weight="101.103" classification="Potasio">KNO3</element>
4   <element base="Calcio" density="1.55" rich="71.8" weight="118.0" classification="Calcio">Ca(NO3)2</element>
5   <element base="Magnesio" density="1.74" rich="71.8" weight="128.2" classification="Sulfatos">Mg(NO3)2</element>
6   <element base="Nitrogeno" density="1.25" rich="71.8" weight="80.0" classification="Nitratos">NH4NO3</element>
7   <element base="Magnesio" density="1.74" rich="71.8" weight="123.0" classification="Magnesio">MgSO4</element>
8   <element base="Nitrogeno" density="1.25" rich="71.8" weight="14.00" classification="Nitratos">NO3</element>
9   <element base="Fosforo" density="1.82" rich="71.8" weight="30.97" classification="Fosfatos">P04</element>
10  <element base="Potasio" density="1.6" rich="71.8" weight="39.1" classification="Potasio">K</element>
11  <element base="Calcio" density="1.55" rich="71.8" weight="40.08" classification="Calcio">Ca</element>
12  <element base="Magnesio" density="1.74" rich="71.8" weight="24.30" classification="Magnesio">Mg</element>
13  <element base="Azufre" density="2.07" rich="71.8" weight="32.06" classification="Carbonatos">S</element>
14  <element base="Hierro" density="7.87" rich="71.8" weight="55.84" classification="Carbonatos">Fe</element>
15  <element base="Boro" density="2.34" rich="71.8" weight="10.81" classification="Carbonatos">B</element>
16  <element base="Manganeso" density="7.43" rich="71.8" weight="54.94" classification="Carbonatos">Mn</element>
17  <element base="Zinc" density="7.13" rich="71.8" weight="65.40" classification="Carbonatos">Zn</element>
18  <element base="Cobre" density="8.96" rich="71.8" weight="63.54" classification="Carbonatos">Cu</element>
19  <element base="Molibdeno" density="10.22" rich="71.8" weight="95.9" classification="Carbonatos">Mo</element>
20  <element base="Cloro" density="3.21" rich="71.8" weight="35.45" classification="Carbonatos">Cl</element>
21  <element base="Sodio" density="0.97" rich="71.8" weight="22.99" classification="Sodio">Na</element>
22 </fertilizer>

```

Figura 56: Archivo XML donde se almacenan los fertilizantes

Una vez que se ha seleccionada una solución nutritiva es necesario definir el tipo de cultivo con el que se quiere trabajar, para ello basta con presionar el botón «Cultivo» y seleccionar uno de los disponibles en el campo cultivo (véase Figura 57). Si es la primera vez que se ingresa será necesario agregar un nuevo cultivo, para esto se presiona en el botón

«Nuevo» y se completan los campos correspondientes. Para completar el proceso de selección del cultivo basta con presionar el botón «Cargar».



The screenshot shows a window titled "Cultivo" with the following elements:

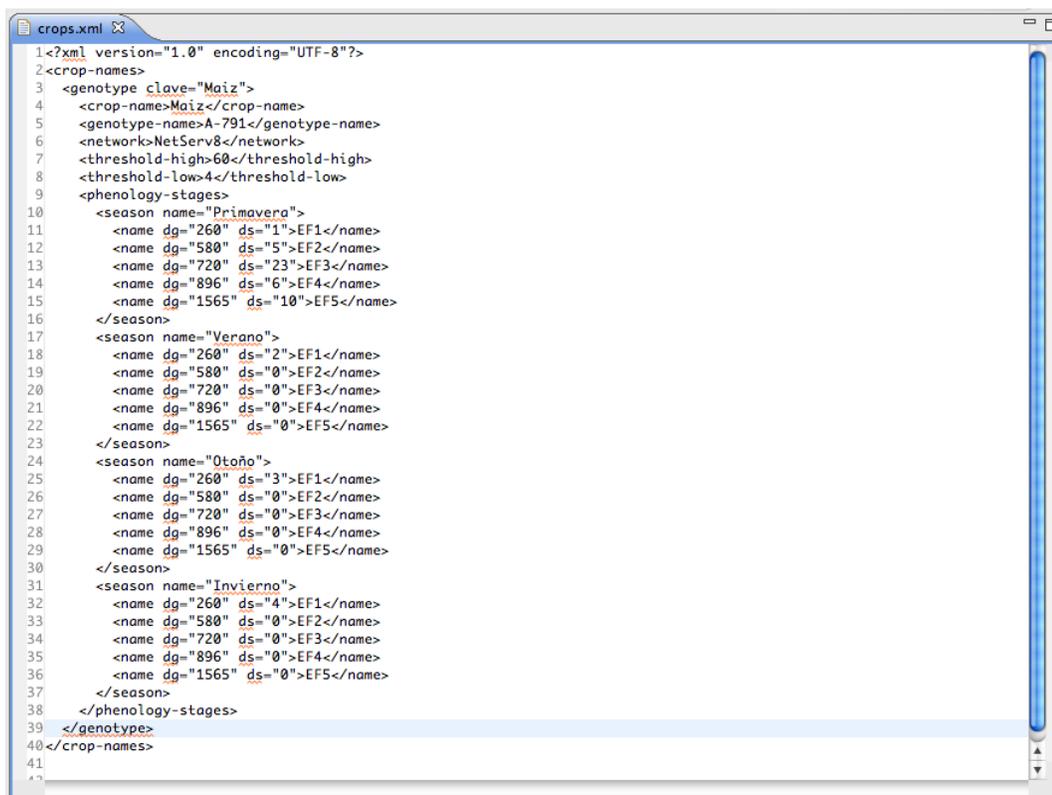
- Cultivo: Tomate (dropdown menu)
- Nombre del cultivo: Tomate (text input)
- Nombre de la red: NetServ8 (text input)
- Nutrientes requeridos: A section with tabs for Primavera, Verano, Otoño, and Invierno. Below the tabs is a table with two columns: Elemento and Cantidad Meq/l.
- Buttons: + and - (for adding/removing rows in the table)
- Sobrescribir Existente: Si No (radio buttons)
- Buttons: Cargar, Guardar, Nuevo, Borrar (at the bottom)

Elemento	Cantidad Meq/l
Carbonato	22.6
Bicarbonato	11.4
Cloruro	8.3

Figura 57: Captura de pantalla de la ventana cultivo

Para almacenar la información sobre los cultivos, se diseñó una plantilla en formato «XML». La plantilla es similar a la que se presenta en la Figura 58. Como se ha podido observar a lo largo de esta sección el formato «XML» ha sido utilizado para crear los archivos de almacenamiento. Como se observa en el figura, la información se organiza por tipo de cultivo, los nombres que se les asignan a los cultivos no pueden ser repetidos debido a que son utilizados como identificador de la estructura.

Por otro lado se definen cuatro periodos que corresponden a las estaciones del año, la idea es definir diferentes requerimientos nutritivos por etapa fenológica y periodo del año de siembra.



```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <crop-names>
3   <genotype clave="Maiz">
4     <crop-name>Maiz</crop-name>
5     <genotype-name>A-791</genotype-name>
6     <network>NetServ8</network>
7     <threshold-high>60</threshold-high>
8     <threshold-low>4</threshold-low>
9     <phenology-stages>
10      <season name="Primavera">
11        <name dg="260" ds="1">EF1</name>
12        <name dg="580" ds="5">EF2</name>
13        <name dg="720" ds="23">EF3</name>
14        <name dg="896" ds="6">EF4</name>
15        <name dg="1565" ds="10">EF5</name>
16      </season>
17      <season name="Verano">
18        <name dg="260" ds="2">EF1</name>
19        <name dg="580" ds="0">EF2</name>
20        <name dg="720" ds="0">EF3</name>
21        <name dg="896" ds="0">EF4</name>
22        <name dg="1565" ds="0">EF5</name>
23      </season>
24      <season name="Otoño">
25        <name dg="260" ds="3">EF1</name>
26        <name dg="580" ds="0">EF2</name>
27        <name dg="720" ds="0">EF3</name>
28        <name dg="896" ds="0">EF4</name>
29        <name dg="1565" ds="0">EF5</name>
30      </season>
31      <season name="Invierno">
32        <name dg="260" ds="4">EF1</name>
33        <name dg="580" ds="0">EF2</name>
34        <name dg="720" ds="0">EF3</name>
35        <name dg="896" ds="0">EF4</name>
36        <name dg="1565" ds="0">EF5</name>
37      </season>
38    </phenology-stages>
39  </genotype>
40 </crop-names>
41

```

Figura 58: Archivo de almacenamiento de la información de los cultivos

Si se han realizado los pasos anteriores presentados en esta sección, lo único que resta por hacer es definir los análisis necesarios y de esta forma calcular el requerimiento de nutrientes por volumen de agua, con el que se regará el cultivo.

El primer análisis que es necesario definir es el de agua. El análisis de agua brinda información acerca de los solutos que se encuentran disponibles en dicha agua, el conocimiento de esta información es de vital importancia para la correcta nutrición del cultivo y la conservación apropiada del medio de siembra.

En la Figura 59 se presenta el formulario para la captura del análisis de agua, el diseño del formulario está basado en un formato utilizado por los laboratorios que realizan los muestreos en el estado de Baja California.

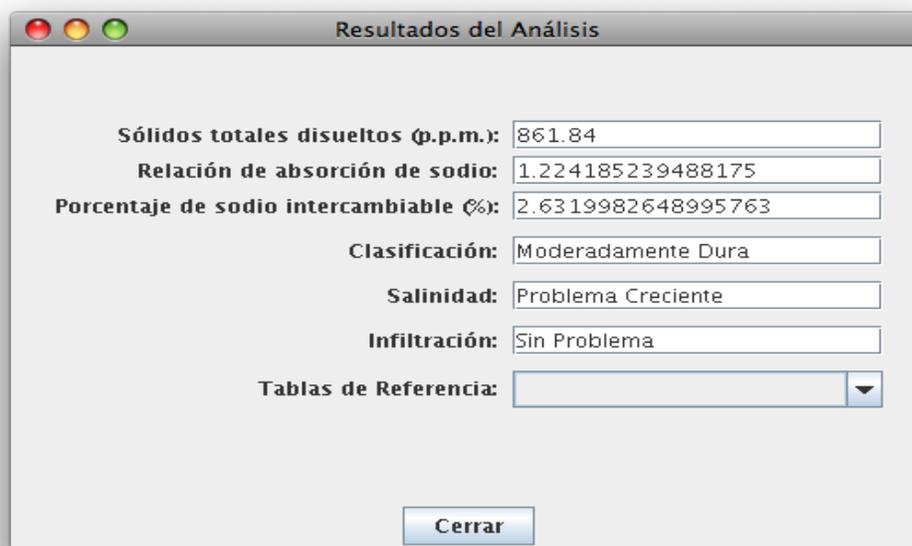
Figura 59: Formato de captura del análisis de agua

La Figura 60 presenta la plantilla para almacenamiento de los análisis de agua.

Figura 60: Archivo XML para almacenamiento de los análisis de agua

Cuando se presiona el botón «Analizar» se presenta una ventana similar a la que se muestra en la Figura 61, la ventana de resultado muestra los niveles de sal y sodio que

fueron detectados en el análisis de agua. Además se presenta un conjunto de tablas de referencia como apoyo a la interpretación de los niveles de infiltración entre otros.



The screenshot shows a window titled "Resultados del Análisis" with the following data:

Sólidos totales disueltos (p.p.m.):	861.84
Relación de absorción de sodio:	1.224185239488175
Porcentaje de sodio intercambiable (%):	2.6319982648995763
Clasificación:	Moderadamente Dura
Salinidad:	Problema Creciente
Infiltración:	Sin Problema
Tablas de Referencia:	[Dropdown menu]

A "Cerrar" button is located at the bottom center of the window.

Figura 61: Captura de pantalla de la ventana de resultados del análisis de agua

Una vez que se ha definido el análisis de agua, dependerá de la técnica de cultivo que se utilice para decidir si es necesario o no contar con la información de un análisis de suelo. Si se utilizaran técnicas como hidroponía o siembra en sustrato no es necesario contar con el análisis de suelo. En caso contrario si se utilizará una técnica de cultivo sobre suelo es indispensable contar con dicho análisis.

Como en el caso anterior del análisis del agua, el formato para el análisis de suelo está basado en una forma oficial para el estado de Baja California. La Figura 62 presenta la forma para captura del análisis en el sistema.

La Figura 63 presenta los resultados del análisis de suelo, se muestran parámetros como la capacidad de intercambio catiónico del suelo, su clasificación entre otros.

Análisis de Suelo

Selecciona un análisis:

Nombre del análisis:

Conductividad eléctrica (dS/m):

Potencial de Hidrógeno (pH):

Aniones

Elemento	me./l	p.p.m.
Carbonatos	1.0	30.0
Bicarbonatos	2.0	122.0
Cloruros	3.0	105.0
Sulfatos	4.0	192.0
Fosfatos	5.0	310.0
Nitratos	6.0	192.0

+ -

Cationes

Elemento	me./l	p.p.m.
Calcio	7.0	140.0
Magnesio	8.0	96.0
Sodio	9.0	207.0
Potasio	10.0	390.0

+ -

Sobrescribir Existente: Sí No

Cargar Analizar Guardar Nuevo Borrar

Figura 62: Archivo de configuración del sistema

Por el contrario no se presenta información sobre la caracterización del suelo, debido a que es necesario un análisis de extracto de pasta saturada.

Resultados del Análisis

Sólidos totales disueltos (p.p.m.):

Relación de absorción de sodio:

Porcentaje de sodio intercambiable (%):

Clasificación:

Capacidad de Intercambio Catiónico (mE/100g):

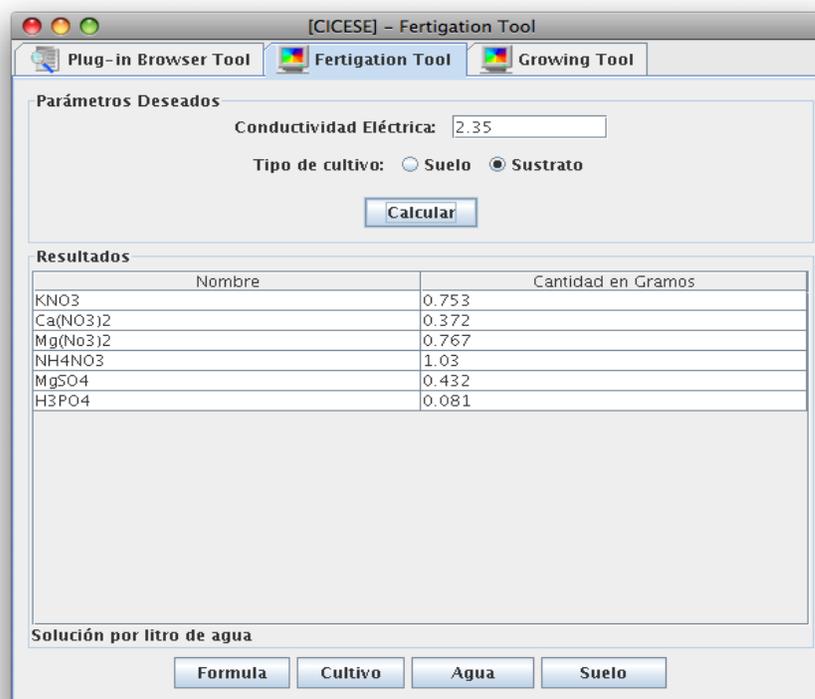
Tablas de Referencia:

Cerrar

Figura 63: Captura de pantalla de la ventana de resultados del análisis de suelo

Cuando se han completado todos los pasos expuestos en esta sección para la técnica de cultivo correspondiente. Solo falta definir el nivel de conductividad eléctrica con el que

se quiere trabajar, ya definido este parámetro se presiona el botón «Calcular», donde enseguida se presenta una tabla de resultados similar a la mostrada en la Figura 64. La tabla con los resultados calculados presenta al tipo de fertilizante y la cantidad a utilizar en una solución por litro de agua.



The screenshot shows a web-based application window titled "[CICESE] - Fertigation Tool". It has three tabs: "Plug-in Browser Tool", "Fertigation Tool" (which is active), and "Growing Tool".

Under the "Parámetros Deseados" section, there is a text input field for "Conductividad Eléctrica" with the value "2.35". Below it, there are two radio buttons for "Tipo de cultivo": "Suelo" (unselected) and "Sustrato" (selected). A "Calcular" button is positioned below the radio buttons.

The "Resultados" section contains a table with two columns: "Nombre" and "Cantidad en Gramos". The table lists the following nutrients and their amounts:

Nombre	Cantidad en Gramos
KNO3	0.753
Ca(NO3)2	0.372
Mg(NO3)2	0.767
NH4NO3	1.03
MgSO4	0.432
H3PO4	0.081

Below the table, there is a label "Solución por litro de agua" and four buttons: "Formula", "Cultivo", "Agua", and "Suelo".

Figura 64: Captura de pantalla que presenta los resultados del calculo de nutrientes para un cultivo dado

Apéndice E

Cuestionario de Evaluación Final

1. Me parece más confiable la manera en la que se realiza la tarea de fertirrigación en el sistema que de la forma tradicional

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

2. Creo que usar el sistema en las tareas de fertirrigación y crecimiento de un cultivo me resultaría fácil

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

3. Creo que es más rápido realizar una tarea de fertirrigación utilizando el sistema que de la forma tradicional

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

4. Es menos confiable estimar el crecimiento de un cultivo utilizando el sistema que la forma tradicional

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

5. Creo que me resultaría difícil usar el sistema sin la ayuda de un experto

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

6. Creo que el uso del sistema no mejoraría el resultado de mi trabajo al realizar una tarea de fertirrigación

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

7. Considero que los resultados del sistema al realizar la tarea de fertirrigación son menos precisos que los calculados con el método tradicional

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

8. Creo que es difícil utilizar el sistema para realizar la tarea de estimación del crecimiento de un cultivo

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

9. Creo que el uso del sistema mejoraría el resultado de mi trabajo al realizar una tarea de estimación del crecimiento de un cultivo.

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

10. La estimación del crecimiento de un cultivo arrojada por el sistema es más precisa que la calculada por método tradicional

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

11. Creo que no tendría problemas de interaccionar con el sistema a la hora de realizar la tarea de fertirrigación

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

12. Creo que usar el sistema permitiría tomar mejores decisiones al realizar una tarea de fertirrigación

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

13. Creo que podría llegar a ser un experto en el manejo del sistema

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

14. Creo que realizar una tarea de fertirrigación en el sistema implica un gran esfuerzo mental

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

15. Creo que el uso del sistema no permitiría ahorrar dinero

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

16. Creo que usar el sistema no permitiría tomar mejores decisiones al realizar una tarea de estimación del crecimiento de un cultivo.

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

17. Creo que es fácil utilizar el sistema para estimar el tiempo de crecimiento de un cultivo

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

18. Creo que el uso del sistema permitiría obtener una mejor relación calidad-precio en producción de cultivos

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad

19. En general, considero útil el uso de Sistema

[] [] [] [] []
 No, con total seguridad Probablemente no Indiferente Probablemente sí Sí, con total seguridad