

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

**SISTEMA COMPUTARIZADO EXPERTO
EN DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL
EN CÍTRICOS //**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN HORTICULTURA**

PRESENTA

TOMÁS MARÍA CORONA SÁEZ

FITOTECNIA



DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
SECRETARIA DE EXAMENES PROFESIONALES

CHAPINGO, EDO. DE MÉXICO, FEBRERO DEL 2000

B.1692456



HORTICULTURA
posgrado
universidad autónoma chapingo

BIBLIOTECA CENTRAL U. A. CH

SISTEMA COMPUTARIZADO EXPERTO EN DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL EN CÍTRICOS

Tesis realizada por **Tomás María Corona Sáez** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: DR. GUSTAVO ALMAGUER VARGAS

ASESOR: M.C. RANFERI MALDONADO TORRES

ASESOR: M.C. JUAN ENRIQUE RODRIGUEZ PÉREZ

A. 36177

SISTEMA COMPUTARIZADO EXPERTO EN DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL EN CÍTRICOS

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de **Tomás María Corona Sáez**, autor de la presente tesis de Maestría en Ciencia en Horticultura, estuvo constituido por:

PRESIDENTE: DR. GUSTAVO ALMAGUER VARGAS

ASESOR: M.C. RANFERI MALDONADO TORRES

ASESOR: M.C. JUAN ENRIQUE RODRIGUEZ PÉREZ

Universidad Autónoma Chapingo
Chapingo, Edo. de México, enero de 2000

DEDICATORIAS

A DIOS, POR LA EXISTENCIA

A MI MADRE, MARÍA NERY SÁEZ DE CORONA, POR MI VIDA Y SUS CLASES DE
ARITMÉTICA EN MI NIÑEZ

A LA MEMORIA DE MI PADRE, BRAULIO MARÍA CORONA COURRECH, QUE ME ENSEÑÓ
LO FUNDAMENTAL DE LA VIDA.

A MI ESPOSA, MARÍA DEL SOCORRO MORALES SOTO, POR SU PACIENCIA.

A MIS HIJOS GABRIELA Y ALEJANDRO, MIS DOS AMORES.

CON TODO MI CARÍÑO A MIS HERMANOS RAQUEL Y ROBERTO.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, por haberme dado mi formación escolar desde la secundaria hasta hacerme un profesional de la agronomía.

A todos mis profesores, por su dedicación. En especial a los Drs. Ignacio Méndez Ramírez y Said Infante Gil, durante mis estudios de maestría en ciencias en Estadística Experimental.

Al Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, donde he laborado por tantos años, por su apoyo para realizar mis estudios de maestría en ciencias en Horticultura.

A los integrantes de mi Comité Asesor de la maestría en Horticultura: Dr. Gustavo Almaguer Vargas, M.C. Ranferi Maldonado Torres y M.C. Juan Enrique Rodríguez Pérez, por su profesionalismo, gentileza y esmero. Por su amistad.

A la Maestría en Ciencias en Horticultura y a su planta académica, por haber colaborado en mi formación.

A los profesores de la Academia de Metodología de la Investigación y Socioeconomía, por su apoyo durante mis estudios.

Al Dr. Jaime Sahagun Castellanos, por su ayuda en diversos momentos y su amistad en todos.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

El autor nació en Mérida, Yucatán, el 31 de agosto de 1943. Vivió durante veinte años en Hermosillo, Sonora, donde realizó sus estudios de licenciatura en la Escuela de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora, en el período 1961-66, obteniendo el título de Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia. En el período 1966-70 se desempeñó como profesional de la agronomía en diversas actividades como son entomología y topografía agrícola, riego, drenaje, investigación agrícola y operación de distritos de riego. Realizó estudios de maestría en ciencias en Estadística Experimental en el Colegio de Posgraduados de la Escuela Nacional de Agricultura, en Chapingo, Edo. de México, en el período 1971-72. Profesor de la Escuela Superior de Agricultura de la Universidad Autónoma de Sinaloa, durante 1972-73 y, desde 1973, profesor de diversas materias de estadística, cómputo y metodología de la investigación, en la Escuela Nacional de Agricultura hoy, Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Algunos de los cargos en los que se ha desempeñado el autor son: jefe de Ingeniería de Riego y jefe del Distrito de Riego del Valle de Guaymas, Sonora en 1969-70; director de la Escuela Superior de Agricultura de la Universidad Autónoma de Sinaloa, durante 1972-73; organizador de la Sección de Estadística Experimental, hoy Academia de Metodología de la Investigación y Socioeconomía del Departamento de Fitotecnia de la UACH; coordinador de la descentralización administrativa de la Universidad Autónoma Chapingo respecto del Gobierno Federal, 1979-80; organizador del Patronato de la universidad y presidente del mismo, 1980-81.

CONTENIDO

RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
ÍNDICE DE CUADROS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivo	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Inteligencia artificial	3
2.1.1. Ramas de la inteligencia artificial	6
2.1.2. Sistemas expertos.....	7
2.1.3. Historia de los sistemas expertos	8
2.1.4. Sistemas expertos y expertos humanos	10
2.1.5. Diferencia de los SE con los programas tradicionales de cálculo.....	11
2.1.6. Tipos y usos de sistemas expertos.....	12
2.1.7. Componentes de los sistemas expertos.....	15
2.1.8. Base de conocimientos sustentada en reglas de producción.....	15
2.1.9. Base de Hechos y Datos	18
2.1.10. Motor de inferencia (MI) o estructura de control.....	18
2.1.11. Mecanismos de búsqueda	20

2.1.12. Interfases con los expertos y los usuarios.....	25
2.1.13. Condiciones de aplicación de los sistemas expertos	27
2.1.14. Otras formas de representación del conocimiento en SE's	28
2.1.15. Redes semánticas.....	29
2.1.15.2. Reglas de producción.....	30
2.1.16. Marcos de referencia (frames)	31
2.1.17. Herramientas de desarrollo de los sistemas expertos	32
2.1.18. Ambientes de desarrollo de SE's o shells	34
2.1.19. Fases de desarrollo de un sistema experto	35
2.1.20. Algunos sistemas expertos desarrollados para la agricultura	37
2.1.20.1. En el proceso de producción agrícola.....	37
2.1.20.2. Relación de algunos sistemas expertos en la agricultura.....	38
2.1.21. La fertilización en naranjo	45
2.1.21.1. Mecanismos de acceso nutrimental.....	46
2.1.21.2. Funciones de los nutrientes en las plantas.....	48
2.1.21.3. Técnicas de análisis nutrimental usadas en fruticultura.....	55
2.1.22. Técnicas de diagnóstico del estado nutrimental en frutales.....	58
2.1.22.1. Técnicas cualitativas.....	58
2.1.22.2. Técnicas cuantitativas. Diagnóstico foliar.....	58
2.1.22.3. Técnica de diagnóstico de Kenworthy.....	60
2.1.23. Conclusiones del marco teórico	62
3. MÉTODOS Y MATERIALES.....	63
3.1. Proceso de elaboración del sistema experto CITRUS	63
3.1.1. Generalidades.....	63
3.1.2. Análisis del problema	63
3.1.3. Establecimiento de la base de conocimientos.....	64
3.1.4. Elección de la herramienta de desarrollo.....	66
3.1.5. Desarrollo de un prototipo	67
3.1.6. Validación del sistema.....	67
3.1.7. Mantenimiento del sistema	67

3.2. La herramienta de desarrollo ARIES	68
3.3. La herramienta de desarrollo Visual Basic.....	72
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
4.1. Pantallas de CITRUS	74
4.2. Una sesión con CITRUS sobre resultados de un análisis foliar	78
4.3. Examen y crítica a los Apartados 4.1 y 4.2	80
4.4. Ventajas y otros elementos del sistema CITRUS-ARIES.....	82
4.5. Estadísticas de la base de conocimientos de CITRUS	82
4.6. El módulo externo de diagnóstico por análisis foliar: DIAGFOL.....	83
5. LITERATURA CITADA.....	85
6. ANEXOS.....	89

RESUMEN

SISTEMA COMPUTARIZADO EXPERTO EN DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL EN CÍTRICOS

Tomás María Corona Sáez

(Bajo la dirección de Gustavo Almaguer Vargas)

El autor ha elaborado un sistema experto computarizado especializado en el diagnóstico del estado nutrimental de los huertos de cítricos. En el artículo se establece la importancia de elaborar este tipo de ingenios computacionales ya que se les considera una herramienta muy útil para sistematizar y concentrar el conocimiento de varios especialistas en alguna problemática y aplicarlo para mejorar el manejo de las huertas. Se examinan los conceptos de inteligencia artificial, sistemas expertos y los principios y técnicas del ambiente de construcción o "shell", con el cual se ha elaborado el sistema experto al que se ha nombrado CITRUS; este examen constituye a la vez una descripción del propio sistema desarrollado. Se presenta un resumen de una sesión típica con el sistema y las estadísticas de su base de conocimientos. En el futuro, el sistema experto puede ser ampliado a los problemas de ataque de plagas y enfermedades infecciosas en cítricos.

PALABRAS CLAVE: Inteligencia artificial, sistemas expertos, bases de conocimiento, nutrición vegetal, cítricos.

ABSTRACT

COMPUTARIZED EXPERT SYSTEM IN NUTRITIONAL DIAGNOSIS IN CITRUS

Tomás María Corona Sáez

(Under the direction of Gustavo Almaguer Vargas)

The author have made a computerized expert system specialized in the diagnosis of the nutrimental status of citrus orchards. The article explains the importance of elaborating this type of computational systems, because they are a very useful tools for systematizing and concentrating the knowledge of several specialists on a topic and applying them to improve the management of the orchards. This paper looks into the concepts of artificial intelligence, experts systems and the principles and techniques of the environmental construction or shell with which has been developed the expert system named CITRUS; this exam is at the same time a description of itself. The paper presents a typical session with the system and the statistics of its basis of knowledge. In the future, the system could be amplified to include the problems related to pest and diseases in citrus.

KEY WORDS: artificial intelligence, expert systems, knowledge basis, vegetal nutrition, citrus.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Esquema general de un marco de referencia (frame) para la representación del conocimiento sobre herbicidas	31
Cuadro 2. Algunos ambientes de desarrollo de SE's o shells que han sido utilizados en la agricultura.	36
Cuadro 3. Estadísticas de la base de conocimientos de CITRUS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales componentes de un sistema experto.	15
Figura 2 Red semántica representando algunas plagas de los cereales	30
Figura 3 Facilidad de uso de las distintas herramientas utilizadas en desarrollo de los sistemas expertos.....	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

A partir de su rápida expansión en la década de los 80's, las computadoras personales o de escritorio han sido, cada vez más, utilizadas en la solución de múltiples problemas en una gran gama de actividades sociales, económicas y culturales, desde los negocios y el gobierno, la producción industrial y agropecuaria, hasta la enseñanza y la investigación científicas.

Sería largo e ineficiente tratar de enumerar aquí los tipos de aplicaciones que se les ha dado a las computadoras en el mundo, en el ámbito de la educación, investigación y la producción agropecuaria. Se mencionan enseguida solo dos tipos que corresponden a los tipos de programas desarrollados en la presente investigación:

1. Aplicaciones de cálculo numérico, tal vez el más usual de los tipos después de los procesadores o editores de texto. Ejemplo de éstas aplicaciones son aquellas que facilitan el cálculo de insumos y costos y la toma de decisiones en las empresas agrícolas y, los programas de modelos de simulación de procesos biológicos, bioquímicos, citológicos, de plantas y de plantaciones completas.
2. Aplicaciones para soluciones inteligentes de problemas, por la vía del cálculo lógico y la heurística, y solo complementariamente por el cálculo numérico. Este tipo de

aplicaciones inteligentes se inscribe en una disciplina científico-tecnológica denominada inteligencia artificial (IA).

El desarrollo de aplicaciones de cómputo en el ámbito agrícola en México, no ha sido nulo pero tampoco abundante; por otra parte, además ha sido pobre la distribución de las aplicaciones desarrolladas en el cuerpo agronómico del país

En particular, el autor ha detectado la necesidad de tres clases de aplicaciones de cómputo para la agricultura y en particular para la horticultura, en el medio mexicano: 1. sistemas expertos para el diagnóstico, toma de decisiones y solución de problemas, 2. sistemas de información especializados en plantas hortícolas, los que almacenen grandes volúmenes de información sobre plantas y permitan el acceso rápido y eficiente de los usuarios a tal información y 3. programas de modelación y simulación de fenómenos y problemas hortícolas.

La progresiva informatización de las actividades agrícolas en general y hortícolas en lo particular, están requiriendo el desarrollo de este tipo de aplicaciones.

1.2. Objetivo

En función de lo anterior, fue planteado para el presente trabajo de investigación el objetivo de desarrollar dos aplicaciones computacionales mediante programación, destinadas a resolver de dos modos complementarios un mismo problema: **un sistema experto computarizado compuesto de dos aplicaciones orientadas al diagnóstico del estado nutrimental en huertos de cítricos**, extendible mediante modificaciones menores, al caso frutales en general , hortalizas, flores o plantas medicinales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Inteligencia artificial

Contrariamente a lo que podría parecer, la idea de la inteligencia artificial (IA) no es nueva; a lo largo de la historia, desde los egipcios y sumerios, muchos imaginaron la forma de dotar de inteligencia a seres no humanos. El Golem de los judíos, el monstruo revivido del Dr. Frankenstein, los robots de Isaac Asimov y Clifford Simak, el gran computador HAL de la novela de ficción científica de Arthur C. Clarke -- '2001 Odisea del Espacio' -- y los simpáticos robots C3PO y R2D2 de la película 'La Guerra de las Galaxias', son algunos ejemplos bien conocidos sobre el tema y las tendencias de la inteligencia artificial, expresadas en la literatura y en la cinematografía.

Con la construcción de los primeros computadores (la primera calculadora programable electrónica, ENIAC, fue construida en 1944) los científicos y técnicos empezaron ya a pensar en la forma de dotar de inteligencia a las máquinas y algunos hasta llegaron a ver en el ordenador un rival potencial de la inteligencia humana. En 1947 el matemático inglés Alan Mathison Turing definió el término de « máquina inteligente ». Poniendo la llamada « verificación de Turing » en palabras llanas, él llegó a la conclusión de que una máquina se puede considerar con inteligencia si al contestar a preguntas de un usuario este no puede discernir si le está respondiendo una máquina o una persona (Hofstadter, 1982). Se levantó un gran interés en el mundo científico y los más optimistas pensaron que las máquinas podrían ser dotadas de cerebro en un plazo corto de tiempo; en 1999 se

sabe que se equivocaron. Retrospectivamente, se puede pensar que el sentimiento de fracaso se debió en buena parte al exagerado optimismo inicial.

El término de inteligencia artificial como rama independiente de la computación, nació en la ya histórica Conferencia de Darmouth, celebrada en el verano de 1956 en el Darmouth College en Hanover, New Hampshire, Estados Unidos, donde se reunieron un grupo de diez especialistas con objeto de estudiar la complicada actividad de la mente humana y animados por la creciente importancia de la computación (Haugeland, 1988).

Definición. La inteligencia artificial se ha definido como aquella rama de la computación que intenta hacer a los ordenadores y sus programas cada vez más inteligentes en el sentido humano (González y Recio, 1996).

Por otra parte, Corona (1998), señala que el campo de la IA tiene en realidad dos grandes objetivos o vías de desenvolvimiento, a saber, 1. el desarrollo de sistemas de cómputo (lenguajes, programas y máquinas) capaces de realizar operaciones y actividades cada vez más inteligentes y 2. la aplicación de estos sistemas y la disciplina científica desarrollada en torno a ellos, al estudio de la inteligencia humana y de la animal, pretendiendo hacer de ello una espiral en desarrollo.

Durante los años 50's, siete universidades destacaron en investigación sobre IA: Stanford, MIT y Carnegie-Mellon en América y las europeas en Edimburgo, Sussex, Essex y el Imperial College, todas en la Gran Bretaña.

Uno de los objetivos de la inteligencia artificial en sus comienzos, fue desarrollar programas que pudieran imitar todas las habilidades humanas conceptuales basándose en la idea de que la resolución de un gran problema podría ser realizada sin la incorporación de una significativa cantidad de conocimiento. Ese ambicioso proyecto no se hizo realidad. Excepto en los casos mas sencillos, la inteligencia artificial se vió desbordada por la complejidad de los problemas tratados en esos momentos (González y Recio, 1996).

Aunque actualmente se puede afirmar que los ingenios de inteligencia artificial distan mucho de aproximarse a la asombrosa complejidad, eficiencia y variadas funciones de la inteligencia natural humana, e incluso de la de los mamíferos más inteligentes, lo cierto es que ha tenido grandes avances respecto a sus comienzos y puede afirmarse que su futuro no solo es promisorio, sino absolutamente necesario (Hofstadter, 1982).

La ilusión inicial que había despertado la IA se vino abajo y pasaron unos años de ostracismo quedando relegada en unas pocas universidades como Carnegie-Mellon, MIT, Standford en Estados Unidos y Edimburgo en Gran Bretaña (Sánchez y Beltrán, 1990).

En los años ochenta la IA empezó a cobrar nuevos auge principalmente por dos razones. La primera fue el gran desarrollo del software y el hardware informático y la segunda correspondió a la industria que empezó a utilizar los productos de IA como una ayuda para solucionar algunos de sus problemas, como en el caso de las armadoras de automóviles, consiguiendo importantes éxitos. A este auge contribuyó de una forma decisiva al desarrollo de los sistemas expertos como rama de la IA.

Hoy en día, dentro de un gran número de objetivos que se plantea la inteligencia artificial es posible resaltar:

- Hacer ordenadores más inteligentes.
- Hacer ordenadores más útiles y potentes.
- Profundizar en el conocimiento de la inteligencia humana.

(Benchimol *et al.*, 1990)

2.1.1. Ramas de la inteligencia artificial

Aunque resulta difícil establecer clasificaciones, ya que normalmente la solución de un problema implica a diferentes áreas de actuación, se puede dividir el árbol de la inteligencia artificial en tres grandes ramas: procesamiento del lenguaje humano, sistemas de reconocimiento de imágenes y sonidos y sistemas basados en el conocimiento (González y Recio, 1996).

Junto con los sistemas expertos, el Procesamiento del Lenguaje Natural es la aplicación más extendida de la IA y comprende la comunicación, en lenguaje natural, con los ordenadores y la traducción automática de textos y voces. En los últimos años se han realizado importantes avances en algunos problemas como son:

- Traducción automática
- Comprensión de textos
- Parafraseo automático
- Generación de textos
- Ayuda a la escritura

(Corona, 1998)

El sistema SIR, que da respuestas sobre un tema determinado, es un ejemplo de esta rama de la inteligencia artificial.

Los Sistemas de Reconocimiento de Imágenes tratan del análisis de formas mediante el ordenador y una de sus utilidades se encuentra en el control e inspección de la calidad en la industria a través robots, lo que ha dado lugar al desarrollo de la Robótica como otra rama de la IA. En agricultura se está utilizando para el desarrollo de robots sembradores

o recolectores y para el análisis de fotografías aéreas y de satélites. SEE un sistema que analiza objetos en un croquis y determina la cantidad de objetos tridimensionales que aparecen, sería uno de los primeros desarrollos en este campo.

Los Sistemas Basados en el Conocimiento refieren a aquellos programas de computador que realizan funciones que imitan algunas de las propiedades asociadas a la inteligencia humana, basados en datos y conocimientos humanos; se suelen dividir en: Bases de Datos Inteligentes, Sistemas de Desarrollo, Entornos de Programación y Sistemas Expertos. Son estos últimos los que más fama han alcanzado y han permitido el gran auge de la inteligencia artificial en los últimos años (González y Recio, 1996).

Corona (1998), presenta la siguiente lista como ramas o vías de desarrollo de la IA:

- Solución de juegos de inteligencia.
- Reconocimiento y proceso del lenguaje humano.
- Reconocimiento de imágenes (patrones) y sonidos.
- Instrucción asistida por ordenador.
- Generación, tratamiento y acceso inteligentes de/a bases de datos.
- Autoprogramación de computadoras.
- Sistemas expertos.
- Redes neuronales.
- Robótica.
- Estudio de la inteligencia animal y humana.

2.1.2. Sistemas expertos

Muchas y variadas han sido las definiciones que se han dado de los sistemas expertos (SE), las cuales han ido evolucionando en el tiempo con las variaciones que han experimentado ellos mismos. Así pues, han sido definidos como:

Definiciones. Los sistemas expertos son programas de ordenadores que resuelven problemas en un campo específico a un nivel comparable al de los expertos humanos (González y Recio, 1996). Se puede añadir una nueva definición que posiblemente se ciña más a lo que se ha pretendido en el presente trabajo, diciendo que un sistema experto es, o intenta ser, una copia computacional de un experto humano en un determinado tema o problemática. Una definición más acabada es: un SE basado en computadora, es un sistema compuesto de bases de conocimientos humanos y programas, lo cual le permite resolver o ayudar a resolver conceptualmente problemas de un ámbito específico, de un modo semejante o aproximado a como lo hace un experto humano en el mismo tema (Corona, 1998).

2.1.3. Historia de los sistemas expertos

Los primeros sistemas expertos se empezaron a desarrollar a finales de los años sesenta, siendo DENDRAL el primer SE desarrollado en 1964. Fue diseñado por Edward A. Feigenbaum en la Universidad de Standford (Estados Unidos) y es utilizado en la investigación química como ayuda a la determinación de la estructura de un compuesto a partir de datos de un espectrógrafo de masas, las mediciones de resonancia magnética nuclear y datos de laboratorio. Aunque este sistema ha sido utilizado con éxito su conocimiento es inferior al de un experto humano (Benchimol *et al.*, 1990).

En la siguiente década se desarrollaron sistemas expertos en diversos ámbitos, como son las matemáticas, en el cual se desarrolló MACSYMA, realizado a principios de los años setenta en el MIT (Estados Unidos) por C. Engleman, W. Martin y J. Moses; sirve de ayuda en la realización de operaciones matemáticas (hasta 600 operaciones) como son integración, diferenciación, cálculo matricial, etc. También de esta época es desarrollado el sistema MOLGEN para ayudar a los biólogos en el diseño de experimentos de genética molecular (González y Recio, 1996).

Un importante hito en la historia de los SE fue el desarrollo del programa MYCIN en 1979, para consulta y diagnóstico de algunas enfermedades infecciosas, que alcanzó un gran éxito y, al parecer, tuvo bastante influencia en el desarrollo que experimentaron los sistemas expertos en los años ochenta, donde realmente empezó la etapa de comercialización de estos ingenios. Fue diseñado en la Universidad de Standford (Estados Unidos) por E.H. Shortliffe como ayuda al diagnóstico y a la decisión terapéutica en la problemática ya indicada. Fue el primer sistema que utilizó el « razonamiento impreciso o con incertidumbre ». Una gran ventaja de MYCIN fue la separación entre su base de conocimientos y su máquina de inferencia, con lo que permite sustituir una base de conocimientos por otra diferente de otra área del conocimiento o temática. Este modelo sirvió para la creación de los programas llamados « shells, conchas, o ambientes de desarrollo » para la creación de los actuales sistemas expertos. La influencia de MYCIN se expandió por todas las áreas haciendo el efecto de un fulminante que disparó la creación de nuevos SE en múltiples campos. Estos fueron sobretodo SE's orientados al diagnóstico y tratamiento de enfermedades, fallas en equipos, exploración petrolera y otros (González y Recio, 1996).

En el campo agrícola la historia es mucho más reciente, remontándose a 1980, cuando Michalski desarrolló el primer sistema experto llamado PLANT/ds, un sistema que diagnostica las enfermedades de la soya en Illinois (Estados Unidos) y que sirvió de base para el desarrollo de otros sistemas, especialmente de diagnóstico. Como se observa, la creación de sistemas para el diagnóstico dominaron los primeros desarrollos de los SE no solo en la agricultura.

En 1983 se desarrolló COMAX, un sistema experto para el manejo del cultivo de algodón, que fue el primer sistema desarrollado en la agricultura que atrajo la atención general. Este sistema tenía la característica de integrar un modelo de simulación del crecimiento del algodón, cuya información utilizaba para recomendar un calendario de fertilización y riego. Esta idea de integración produjo un empuje importante para la utilización de los sistemas expertos en agricultura, expandiéndose su aplicación por todas las áreas de la misma (González y Recio, 1996).

En España los primeros desarrollos en agricultura datan de la segunda mitad de los años ochenta con sistemas como SIEXMAL, para la identificación de plántulas de malas hierbas en cereales y SEXIA como ayuda a la identificación del tipo de aceite de acuerdo con la variedad de aceituna y/o la denominación de origen (González y Recio, 1996). También en Cuba, desde los postreros años 80's, han estado trabajando no solo en la elaboración de SE orientados hacia algún aspecto de la agronomía o la producción agrícola, sino que incluso sus especialistas en cómputo e inteligencia artificial han realizado interesantes desarrollos en herramientas para la confección de SE's, llamados shells o conchas, como es el caso del ambiente de trabajo denominado ARIES (Valdéz et al., 1989).

2.1.4. Sistemas expertos y expertos humanos

Aunque actualmente los SE's no pueden sustituir a los expertos humanos son, sin duda, una herramienta que puede ayudar a realizar el trabajo de forma rápida y fácil. Además poseen o pueden llegar a poseer una serie de importantes ventajas como son:

Es fácil de transportar para llevarlo al sitio donde es requerido, en el cual no se cuanta con un experto humano; un simple disquete puede ser suficiente para contenerlo.

Es permanente, los problemas se pueden ir resolviendo a medida que se van planteando y las decisiones se pueden tomar rápidamente, lo que en algunos casos es de vital importancia.

Puede cooperar con el propio experto humano en la solución de algún problema de su competencia, aunque esto también lo puede hacer un programa clásico.

Puede ayudar a mejorar la productividad haciéndose cargo, por ejemplo, de trabajos rutinarios o ayudando a realizar el trabajo más rápidamente.

Permite conservar los valiosos conocimientos de uno o más especialistas, aunque estos fallezcan. Además, es sencillo de documentar, mediante la inclusión de nueva información a su base de hechos y conocimientos.

El SE puede ser utilizado como instructor y formador de personal calificado, ya que puede ayudar a formar nuevos científicos o técnicos ayudándoles a entender como un especialista resuelve un problema o aplica sus conocimientos.

Sin embargo y desde luego, existen algunas características intrínsecamente humanas que los sistemas expertos no pueden hoy por hoy imitar, por ejemplo, el experto humano es creativo, imaginativo, adaptable, posee percepción sensorial (los sentidos) y, algunas veces, incluso sentido del humor (González y Recio, 1996; Sánchez y Beltrán, 1990)

2.1.5. Diferencia de los SE con los programas tradicionales de cálculo

Los sistemas expertos no dejan de ser programas de cómputo, sin embargo la diferencia básica con los programas tradicionales denominados procedurales, es que los sistemas expertos manipulan conocimiento y los otros manipulan solo datos; existe una gran diferencia conceptual entre estos dos tipos de información. Para resolver un problema los programas procedurales utilizan algoritmos que le indican a la máquina a cada momento, que hacer, cómo hacerlo y cuándo hacerlo, mientras que el proceso básico de resolución de problemas por los sistemas expertos es un proceso, primero, declarativo de objetivos y después de búsqueda y comparación de patrones para encontrar conexiones y relaciones y arribar a inferencias. Se diría que hay más búsqueda lógica que cómputo en los SE's (Corona, 1998; Benchimol *et al.*, 1990).

A continuación se presenta un resumen comparativo de algunas diferencias entre ambos tipos de programas. Como características de los sistemas expertos se pueden citar:

- Captación, representación y uso de conocimiento.
- Métodos heurísticos: búsqueda, hallazgo (Apartado 2.1.11).
- Procesos inferenciales (lógica).
- Incorporación de conocimientos y respuestas con incertidumbre o probabilidad.
- Fácil actualización y transporte.
- Las respuestas incorrectas pueden ser procesadas.
- Mecanismo de control separado del espacio del conocimiento.

Frente a las características de los programas clásicos que son:

- Representación y uso de datos, no de conocimiento en sentido amplio.
- Método algorítmico (instrucciones).
- Proceso repetitivo o recurrente.
- Difícil de actualizar.
- Las respuestas deben ser correctas si se quieren soluciones correctas, pues no aceptan datos con grados de incertidumbre.
- Mecanismos de control y dominio del conocimiento integrados.

2.1.6. Tipos y usos de sistemas expertos

Cada día que pasa se están abriendo nuevos campos de aplicación de los sistemas expertos con lo cual las clasificaciones que se realizan quedan obsoletas rápidamente. A riesgo de que suceda lo mismo se dará una clasificación según su área de aplicación, a pesar de que empiezan a ser demasiado amplias, pero hay ciertas áreas donde los sistemas expertos han alcanzado importantes éxitos.

Análisis e Interpretación

Los sistemas expertos son muy eficiente a la hora de interpretar una gran cantidad de información. Este tipo de programa es muy utilizado en las actividades financieras. En agricultura se están utilizando cada vez más para analizar e interpretar los resultados producidos por los modelos de simulación tan extendidos en el ámbito agrícola; como ejemplo se tiene el sistema GOSSYM/COMAX donde el sistema experto COMAX interpreta la salida del modelo de simulación del crecimiento del algodón, GOSSYM, para brindar un calendario de riego y fertilización para dicho cultivo.

Predicción o Prospección

Este tipo de programa establece la predicción de nuevas situaciones a partir de una situación dada. Un ejemplo, muy rentable económicamente, es PROSPECTOR, comentado líneas atrás, que ayuda al descubrimiento de yacimientos mineros y petrolíferos. La agricultura es otro campo donde la realización de predicciones mediante la utilización de los sistemas expertos ha sido muy positiva. Existen sistemas que realizan con ayuda de señales de satélites, en tiempo real, estimaciones de cosechas, previsiones de plagas, heladas, etc.

Diagnosis e Identificación

Este es el tipo de casos donde resulta especialmente adecuado y exitoso el uso de los SE's y consiste, genéricamente, en identificar la causa por la cual un sistema no funciona correctamente o está siendo afectado por ciertos hechos o se encuentra en determinados estados. La medicina y la parasitología agrícola y pecuaria son campos donde existen

multitud de sistemas expertos de este tipo. Un ejemplo es el sistema PUFF que ayuda a los médicos a diagnosticar enfermedades del pulmón. Otro ejemplo es el programa HELP que ayuda a determinar qué medicamento y dosis administrar, ahorrando dinero y evitando al médico la experimentación con distintos medicamentos hasta encontrar el adecuado.

Esta modalidad de sistemas expertos han alcanzado un nivel importante de aplicabilidad en protección vegetal. Programas como SIEXMAL que realiza la identificación de plántulas de malas hierbas en cereales y otros semejantes, son una prueba de ello.

Diseño

Se utilizan para el diseño de circuitos integrados complejos, edificios, instrumentos y otros.

Planificación

La utilización de algunos SE's permite elaborar planes de actuación para proyectos de gran escala donde se encuentran implicadas secuencias de acciones de alta complejidad para lograr las metas deseadas. Un ejemplo sería el programa americano TATR que planea ataques aéreos contra instalaciones aeronáuticas del enemigo o AIRPLAN que planifica el tráfico aéreo militar.

Enseñanza

Una de las grandes potencialidades que tienen los sistemas expertos es su uso didáctico. Se han desarrollado sistemas expertos para la enseñanza, como el sistema SOPHIE que es un prototipo en desarrollo diseñado para enseñar a los técnicos cómo detectar y

reparar las averías de los circuitos electrónicos o el sistema DEBUGGY que identifica los errores cometidos por el usuario al realizar operaciones aritméticas.

Mantenimiento

Desarrollan y ejecutan planes para administrar el mantenimiento a instalaciones o equipos. Así, existen sistemas expertos para el mantenimiento de ordenadores, por ejemplo.

Control

Los sistemas expertos son una herramienta de trabajo que es bastante utilizada en el sector industrial. Se puede citar como aplicaciones típicas de dicho sector aquellas que se utilizan en centrales eléctricas, centrales nucleares, etc., supervisando el comportamiento del sistema en base a las variables fundamentales. De este tipo serían, por ejemplo, los sistemas expertos para el control de la fertiirrigación en la agricultura (Sánchez y Beltrán, 1990; Gonzáles y Recio, 1996).

2.1.7. Componentes de los sistemas expertos

En la Figura 1 se presenta un diagrama que expone los principales componentes de un sistema experto.

2.1.8. Base de conocimientos sustentada en reglas de producción

La base de conocimientos (BC), constituye uno de los elementos fundamentales de los sistema expertos. Está formada por todos los conocimientos sobre un tema específico

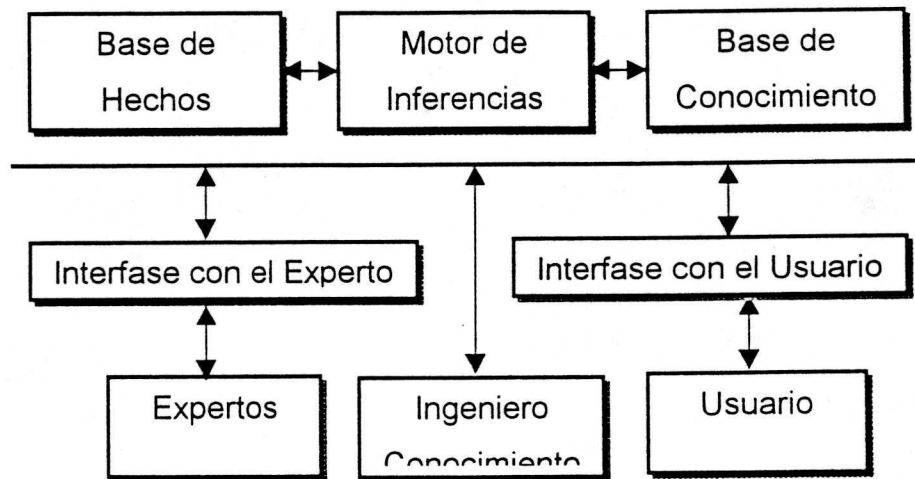


Figura 1. Principales componentes de un sistema experto.

(p.e. maquinaria agrícola, enfermedades del tomate, etc.). Su contenido será fundamental para la resolución de los problemas que se puedan plantear al sistema. Es obvio que de la calidad del conocimiento que contenga va a depender la calidad del SE y la bondad de la solución aportada por él.

La BC en sentido laxo contiene dos tipos de conocimientos: los hechos relativos al tema o problema y los conocimientos fundamentales que relacionan los hechos entre sí. En la práctica es necesario separar los hechos de los conocimientos fundamentales, y concebir entonces una base de hechos y una base de conocimientos en sentido estricto.

Conocimientos fundamentales

Los conocimientos fundamentales representan las relaciones causales existentes entre los distintos tipos de hechos, según los expertos humanos consultados. En una de las formas

de representación del conocimiento, las reglas de producción, estas establecen relaciones del tipo: **SI** antecedente **ENTONCES** consecuente.

Por ejemplo, una regla podría ser, considerando un problema de arvence en una plantación, el establecer que:

SI una arvence no tiene cotiledones **ENTONCES** es una gramínea [con grados de incertidumbre de verdadero y falso].

Esta regla representa un conocimiento fundamental del o de los expertos en el tema. Véase cómo se relaciona así un hecho "una mala hierba no tiene cotiledones" con otro "es una gramínea".

En muchos sistemas expertos se utilizan reglas y se permite la entrada de datos con incertidumbre, atendiendo a la realidad de que no siempre el experto está completamente seguro de la verdad de una regla o un usuario no siempre lo ésta de un dato que proporciona al sistema. Las reglas con incertidumbre corresponden al formato: **SI** antecedente **QUIZÁS** consecuente. Los sistemas, en sus interfases a los expertos o a los usuarios, proporcionan la forma de que ambos introduzcan además de una regla o un dato, un valor de incertidumbre (un valor entre -100 y +100) correspondiente.

A pesar de su forma, las reglas de producción no son implicaciones lógicas en las cuales si el argumento del **SI** es verdadero forzosamente el argumento del **ENTONCES** también lo es. En estas reglas, que solo expresan la experiencia del experto, si el argumento del **SI** es verdadero, el argumento del **ENTONCES** puede serlo, o no, o quizás con un valor de incertidumbre. Las reglas representan una de las formas en que el experto se aproxima al problema y no requieren pruebas matemáticas o validación estadística y por lo tanto tampoco algoritmos, pero sí heurísticos¹ (Benchimol *et al.*, 1990).

¹ Apartado 2.1.11

La base de conocimientos es siempre un producto inacabado, siendo constantemente adaptada y expandida para incluir nuevos conocimientos o reemplazar los obsoletos. Al estar la base de conocimientos separada del resto de los componentes del SE (base de hecho y motor de inferencia) es relativamente fácil efectuar los cambios necesarios.

2.1.9. Base de Hechos y Datos

Los hechos son verdades, situaciones presentes o posibles, y relaciones entre las distintas variables del sistema admitidas por los expertos. Así, por ejemplo, un hecho tratándose de deficiencias de nutrimentos en plantas, es la afirmación de que « las hojas están cloróticas » o « los frutos son pequeños y de epidermis gruesa ». Los hechos están almacenados en la base de hechos del sistema. Los datos son hechos dados por el usuario al sistema al momento de una consulta o sesión, para proceder a la búsqueda de soluciones..

2.1.10. Motor de inferencia (MI) o estructura de control

Constituye junto con la base de conocimientos uno los pilares fundamentales del sistema experto. Controla el proceso de razonamiento del sistema; permite, mediante la selección de los hechos y reglas (suponiendo que el conocimiento está representado de esa forma) y los datos suministrados por el usuario alcanzar una solución o recomendación.

Las dos funciones básica de este « gestor » que es el motor de inferencia son inferir y controlar. La inferencia se refiere al examen de las reglas y a la ejecución de los programas de comparación de patrones, mientras que el control se refiere a la secuencia en que se examinan las reglas. El motor de inferencia examina cada regla en una

secuencia determinada -- existen varias formas de hacerlo -- para obtener nueva información. Este análisis de las reglas se realiza a través de varios métodos, entre ellos: el encadenamiento progresivo y encadenamiento regresivo de reglas.

Cuando se emplea el encadenamiento regresivo, se selecciona como hipótesis uno de los posibles resultados u objetivos y se recorre la base de conocimientos en busca de datos que apoyen dicho resultado; cuando la información disponible confirma la hipótesis (si es que lo hace), ésta se transforma en la recomendación o solución que da el sistema. En el encadenamiento progresivo, los datos de entrada deben satisfacer la condición **SI** de las reglas almacenadas en la base de conocimientos hasta alcanzar una solución (González y Recio, 1996).

Sánchez y Beltrán (1990) explican:

Un motor de inferencia es el sistema de control de un SE, que construye de forma dinámica las soluciones. El MI selecciona, decide, interpreta y aplica el conocimiento de la de la BC sobre la BH con el fin de obtener la solución buscada.

El funcionamiento general de una BC es el siguiente:

1. Evaluación, con lo cual se selecciona el conocimiento a emplear.
2. Comprobación, de que el conocimiento seleccionado es aplicable.
3. Ejecución, en el cual se aplica el conocimiento.
4. Comprobación, condición de finalización.
5. Control de las reglas activas.

Un MI está definido por las siguientes características:

1. El lenguaje en que está escrito.
2. La velocidad de trabajo (inferencias por segundo).
3. Las estrategias de control que utiliza.

4. La posibilidad de utilizar metaconocimiento¹.
5. El de la lógica que emplea.
6. El método de evaluación que emplea.

Como característica más importante del MI de un SE, es el que sea independiente de la base de hechos y de la base de conocimientos. Esto significa que se puede utilizar el mismo MI con distintas bases. Por lo que un mismo MI puede ser el mismo en diferentes sistemas expertos, si se trata de un MI bien construido. En el pasado los MI's eran muy específicos para el SE para el que eran elaborados.

2.1.11. Mecanismos de búsqueda

Un motor de inferencia puede utilizar dos tipos de estrategias en la búsqueda de soluciones (respuestas) dentro del espacio de todas las posibles, cuando la base de conocimientos está compuesta por reglas de producción, a saber:

-- La **búsqueda no ordenada de soluciones** que puede a su vez ser:

Aleatoria: en la que se recorre de forma exhaustiva toda la BC, método que solamente es válido cuando ésta es pequeña y/o la velocidad de búsqueda de la computadora es alta. Con este tipo de búsqueda se encuentran todas las soluciones posibles, con lo que se puede elegir la óptima.

Heurística: en la cual se divide la BC en módulos y solamente se busca en alguno de estos, según lo indique el metaconocimiento; este método de búsqueda ahorra gran cantidad de tiempo pero, la solución alcanzada mediante este método se aproxima a la solución óptima solo en la medida de que sea bueno en conocimiento heurístico que contenga la BC

¹ Metaconocimiento: el conocimiento de cómo utilizar los conocimientos sobre un tema.

Un heurístico, a diferencia de un algoritmo, es un proceso creador, es decir, un proceso que en el camino crea rutas de búsqueda de soluciones, que a partir de un conjunto de operaciones elementales suficientes resuelve todos los problemas de una clase. En cambio un algoritmo, que no es propio de los sistemas expertos, excepto complementariamente, es un procedimiento para ejecutar en un orden único determinado previamente, un conjunto de operaciones elementales, suficientes para la solución de todos los problemas de una clase. Los algoritmos son resolutivos: siempre llegan a una solución, los heurísticos no lo son, no garantizan llegar a una solución óptima, pero en el tipo de problemas que se abordan por los sistemas expertos, al igual de lo que pasa con los expertos humanos "en campo", la mayor parte de las veces no existen algoritmos y se debe proceder heurísticamente. Un algoritmo es algo más propio de la matemática, un heurístico lo es de la lógica (Winston, 1994). La búsqueda heurística es mucho más rápida que la exhaustiva, a igualdad de rapidez computacional, y es tanto más necesaria cuanto mayor es el número de soluciones posibles.

-- La **búsqueda ordenada de soluciones** se basa en el encadenamiento del conocimiento cuando éste está representado en forma de reglas de producción (*Vid. atrás*). Este encadenamiento se consigue haciendo que el consecuente o acción de una regla (el hecho argumento del **ENTONCES**) se convierta en el antecedente (el hecho argumento del **SI**) de la siguiente regla a considerar por el mecanismo de control.

El encadenamiento genera estructuras en forma de árbol. El encadenamiento puede darse por terminado cuando se encuentra una solución o el conjunto total de las mismas.

La búsqueda ordenada de soluciones admite el uso de heurísticos o algoritmos que permiten la poda del árbol de hechos. Tanto los heurísticos como los algoritmos pueden ser "ciegos" si actúan sin tener en cuenta el conocimiento sino solamente la estructura o los coeficientes incluidos para ese fin, o "no ciegos" si lo que consideran son los conocimientos de la base correspondiente (Sánchez y Beltrán, 1990).

Existen al menos dos clases de encadenamiento que son:

-- **El encadenamiento hacia delante o guiado por los datos o deductivo** consiste en enlazar los conocimientos a partir de unos datos con el fin de obtener una solución o respuesta de un problema. Esta clase de encadenamiento está basado en el *modus ponens* de la lógica formal, el cual dice: Si se conoce la regla: «Si A entonces B» y es cierto A, entonces se puede deducir que B es también cierto.

Véase el siguiente ejemplo, donde Rn significa regla enésima:

R1: si B y C entonces A

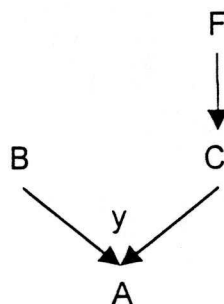
R2: si C y D entonces A

R3: si E entonces B

R4: si F o G entonces C

Si se le dan al sistema los datos B y F, el sistema da como resultado la respuesta A, aplicando las reglas R1 y R4.

El árbol que se ha creado es:



Dado que en el proceso de encadenamiento hacia delante se generan nuevos hechos, existen dos formas de tratarlos, que son: en profundidad cuando en cuanto se genera un hecho se introduce en la BH, o en anchura cuando no se incorporan los hechos a la BH hasta que se ha terminado de aplicar la BC

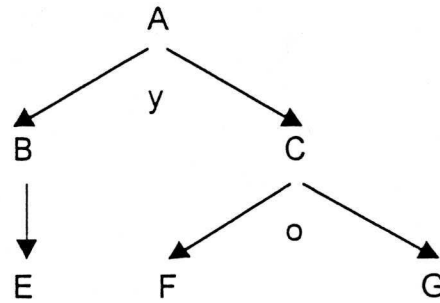
Este modo de encadenamiento es el caso de la realización de una suma, del armado de un rompecabezas, o la forma de razonar de Sherloc Holmes, el detective británico de Sir Conan Doyle. En general las soluciones obtenidas pueden ser más de una. De un hecho o respuesta así deducida se puede asegurar su verdad. La ventaja del encadenamiento hacia delante, desde el punto de vista técnico, estriba en su sencillez, y que la entrada de los datos del consultante es única y al principio de la sesión.

-- **El encadenamiento hacia atrás o guiado por los objetivos o inducido** consiste en comprobar que un objetivo es cierto con base en un universo de hechos y conocimientos que conforman el sistema. Este tipo de encadenamiento se puede asimilar al proceso de contrastación de hipótesis del método científico.

Este encadenamiento tiene su fundamento en el *modus tollens* de la lógica formal, que indica que: Si se conoce la regla «Si A entonces B» y también se conoce que A es falso, entonces se puede afirmar que B también lo es.

Por ejemplo, con las mismas reglas que se utilizaron al exponer el encadenamiento hacia delante, se le da al sistema la siguiente información a través de la sesión: *dados E y F obtener que es cierto A, a lo que el sistema responderá: A es cierto, tras haber aplicado las reglas R1, R3 Y R4.*

El árbol que se ha creado es:



En este tipo de encadenamiento, las soluciones deben ser conocidas de antemano (las respuestas que se requieren), mientras que los datos deben irse introduciendo a lo largo de la consulta.

De un hecho (respuesta) así inducido se puede asegurar su no falsedad. La ventaja de este método es su gran potencia; los inconvenientes técnicos son la necesidad de utilizar y programar procesos recursivos.

-- **El encadenamiento mixto** que es el más empleado en los SE consiste, primero, en buscar un conjunto de soluciones mediante encadenamiento hacia delante, tras lo cual mediante un encadenamiento hacia atrás, se verifican estas soluciones.

Las estructuras de árbol, como las generadas por el encadenamiento de reglas, puede ser recorrida en dos sentidos: en anchura, es decir que se contemplan todas las posibilidades de un nodo antes de pasar al siguiente nodo o bifurcación del árbol y, en profundidad, en la cual no se toma otra posibilidad en un nodo hasta que no se ha desarrollado completamente una rama.

Una encuesta hecha en Japón en 1986 (Sánchez y Beltrán, 1990), reporta los porcentajes de SE que están basados en los tipos de motores de inferencia descritos antes; los resultados fueron:

- 56.1% emplean encadenamiento hacia delante y el resto encadenamiento hacia atrás.
- 30.5% utilizan reglas y datos con incertidumbre.

2.1.12. Interfases con los expertos y los usuarios

Hace referencia a la comunicación que debe existir entre el ordenador y la persona que lo utiliza, por una parte los expertos o el ingeniero en conocimientos, que introducen los *conocimientos* a las bases de hechos y de conocimientos, y por otra parte los usuarios que se acercarán al sistema para consultarlo y que deberán introducir los *datos* que el sistema les solicite. Para que esta comunicación se lleve a efecto, es necesario dotar al sistema de uno más de sus componentes: la interfase para los expertos y la interfase para los usuarios. Estas interfases son pantallas, ventanas, menús y representaciones gráficas en las cuales, en los sitios indicados, el usuario en general, escribirá palabras o números mediante el teclado o hará click con el ratón de la computadora.

Las interfases, sobre todo la del usuario, es un componente de los SE al que se le está reconociendo un mayor protagonismo a la hora de conseguir un programa que ofrezca unas buenas prestaciones e, igualmente, es una pieza clave a la hora de la aceptación del programa por parte del usuario.

Ejemplo de funcionamiento de los sistemas expertos basados en reglas (González y Recio, 1996):

Utilizando un ejemplo muy sencillo, en el área de Protección de Cultivos para el control de insectos y malas hierbas, nótese como funcionaría un sistema experto donde la base de conocimientos está formada por cuatro reglas y el motor de Inferencia utiliza el encadenamiento progresivo:

Base de Conocimiento:

Regla 1

SI el problema es un insecto ENTONCES es un díptero.

Regla 2

SI el problema es una planta ENTONCES es una gramínea.

Regla 3:

SI el insecto es Mosca Blanca ENTONCES aplicar el insecticida Buprofezin 25 %.

Regla 4:

SI la gramínea es Avena Loca ENTONCES aplicar el herbicida Trialato.

Al iniciar la sesión con el usuario el sistema preguntaría:

-¿Cual es su problema: un insecto o una planta ?

y si se contesta, por ejemplo, *una planta*,

entonces el motor de inferencia se pondría en marcha en proceso de control empezando a examinar la regla 1 (en algunos casos pueden ser miles de reglas con lo que el examen puede ser bastante complicado) y, también, en proceso de inferencia e intenta confirmar la parte **SI** de las reglas. Siguiendo dicho proceso el motor inferencia desecharía la regla 1, posteriormente pasaría a la regla 2 encontrando que cumple la parte SI, encontrado en

la cláusula de ENTONCES, que se trata de una gramínea, incorporando el hallazgo como un nuevo hecho; con este hecho sigue analizando las reglas hasta que encuentra que la regla 4 cumple el condicional SI, alcanzando la conclusión y, por consiguiente, dando la siguiente recomendación:

- *aplicar el herbicida Trialato.*

2.1.13. Condiciones de aplicación de los sistemas expertos

No siempre será posible o necesario aplicar los sistemas expertos a la resolución de un problema. Para resolver un problema con la tecnología de los SE's, se han propuesto diferentes pruebas de viabilidad, las cuales indican cuando la tecnología es adecuada al problema. A continuación, González y Recio (1996), describen los aspectos más significativos en función de las tareas a desarrollar, los expertos y el entorno de aplicación:

En cuanto a las tareas que se desean resolver con los sistemas expertos, las más adecuadas son aquellas que:

- Requieren experiencia.
- Razonamiento simbólico.
- Uso de heurísticas para acortar los procesos de búsqueda.
- La tarea se resuelve con conocimiento incierto o incompleto.
- El experto resuelve el problema en la realidad.
- No se buscan soluciones óptimas o muy precisas, sino soluciones aproximadas, generación de alternativas, recomendaciones, etc.
- Su modelización se adapta a un desarrollo en base a prototipos.

En cuanto a los expertos:

- Es muy importante que exista una convergencia en soluciones y métodos de resolución por parte de los expertos que intervengan en el proceso.
- Existencia de conocimiento que se puede perder.
- Cuando los expertos son escasos y caros.
- Cuando los expertos son capaces de articular su proceso de razonamiento.

En cuanto al entorno de aplicación:

- Es posible la validación del sistema.
- Represente una adecuada transferencia de tecnología.
- Sea necesario distribuir conocimientos o información en un medio disperso.
- Se prevé una inversión social, económica o medioambiental importante.
- Los usuarios estén familiarizados con el uso de la informática.

2.1.14. Otras formas de representación del conocimiento en SE's

La potencia de un sistema experto radica en su base de conocimientos, cuanto mas amplia sea ésta mejor será el sistema experto desarrollado. Pero una vez que se dispone de ese conocimiento, "extrayéndolo" el ingeniero del conocimiento de los expertos, se plantea el problema de como implementarlo dentro del ordenador, cómo alimentar a la computadora con él. Este es un tema donde se está realizando actualmente un gran esfuerzo de investigación dentro del campo de la inteligencia artificial. Aun cuando existen muchas maneras de representar el conocimiento, se considerarán aquí las de más frecuente utilización en agricultura, como son:

- Redes semánticas.
- Reglas.
- Marcos de referencia (Frames).

2.1.15. Redes semánticas

Introducidas a finales de los años sesenta es el sistema más sencillo y antiguo de representar el conocimiento y consiste en una representación gráfica del mismo que ilustra las relaciones entre objetos, conceptos, situaciones, etc. Cada objeto es llamado un *nodo*, unidos ellos mediante arcos o enlaces que indican las relaciones existentes entre ellos, y formando una red. Normalmente llevan asociada una palabra, que en el caso de los nodos es un nombre y en el de los enlaces es un verbo.

El interés de las redes semánticas se basa en varios puntos:

- Presentan un esquema útil de presentar la información.
- Permiten codificar o presentar hechos o conceptos que se pueden representar en cualquier otro sistema formal. (Sánchez y Beltrán, 1990).

En la Figura 2 se ilustra un ejemplo de una sencilla red semántica sobre algunas plagas de los cereales. Utilizando la red semántica es posible responder a multitud de preguntas recorriendo los nodos y arcos. En el ejemplo de la Figura 2, a la pregunta sobre ¿que es *Sitobion avenae* el sistema daría como respuesta: es una plaga.

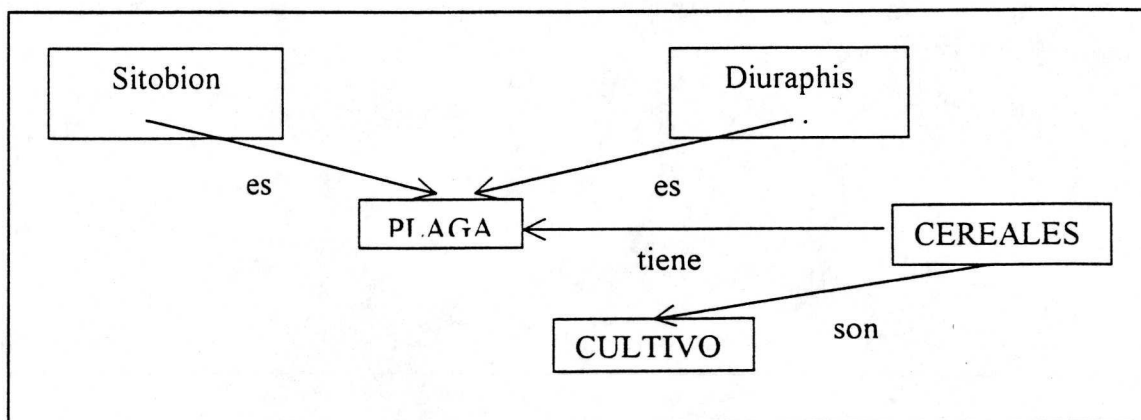


Figura 2. Red semántica representando algunas plagas de los cereales

2.1.15.2. Reglas de producción.

De las reglas de producción se trató ya en los apartados 2.1.9, 2.1.10 y 2.1.11. Se recordará simplemente que las reglas de producción son una colección de heurísticos que los expertos usan típicamente para alcanzar una solución, no necesariamente óptima, en un tiempo razonable. Es el método más común de representar el conocimiento dentro de los sistemas expertos desarrollados en la agricultura.

Las reglas constan de dos partes: la premisa o antecedente y la conclusión o consecuente. A su vez la premisa puede constar de varias proposiciones (que representan hechos o datos) conectados por las operaciones lógicas "Y", "O", "NO". La conclusión puede constar también de varias proposiciones conectadas exclusivamente por un "O" exclusivo: Cada proposición del consecuente puede llevar las indicaciones del grado de incertidumbre (de los expertos) de que si en antecedente completo es cierto, en que medida piensa el experto que será cierto o no será cierto el consecuente.

En algunos sistemas las proposiciones que representan a los hechos del problema se le proporcionan al SE en archivos de texto indexándolas a un número de proposición. Una regla puede entonces tomar la forma siguiente, como ejemplo (Corona, 1998):

SI (2 y 3) o (34 o 23) y no(4) **ENTONCES** 12[95, -20], 20[100, 0]

Los grandes sistemas expertos pueden contener miles de estas proposiciones y reglas de este tipo. Las reglas dotan de una gran flexibilidad a los sistemas expertos permitiendo la modificación, borrado y creación de las bases de conocimiento de una forma rápida y cómoda.

2.1.16. Marcos de referencia (frames)

Fueron propuestos a mediados de los años setenta y pueden ser contemplados como una colección de conocimientos interrelacionados sobre un determinado tópico. Un marco da toda la información existente sobre un determinado objeto con lo cual se describe en detalle. El marco de referencia está compuesto por diferentes elementos denominados "ranuras" (slots) donde se contienen los atributos del objeto que se describe. Se utilizan principalmente para representar el conocimiento que se tiene de las cosas, pudiendo decir que es como un resumen de las mismas.

El Cuadro 1 presenta el esquema general de un marco de referencia para herbicidas. Los marcos de referencia se pueden encadenar entre sí formando jerarquías, lo que hace más compacto el conocimiento, y permite su representación de una forma más profunda.

Cuadro 1. Esquema general de un marco de referencia (frame)
para la representación del conocimiento sobre herbicidas.

Frame: Nombre del Herbicida

MALAS HIERBAS CONTROLADAS

Ranura (Slot): Mala hierba

Mala hierba 1, Control, Estado de desarrollo

Mala hierba 2, Control, Estado de desarrollo

.....

Mala hierba N, Control, Estado de desarrollo

CULTIVOS

Ranura (Slot): Cultivo

Cultivo I, Estado de desarrollo

Cultivo 2, Estado de desarrollo

.....

Cultivo M, Estado de desarrollo

AMBIENTE

Ranura (Slot): Tipo de suelo

Ranura (Slot): pH del suelo

Ranura (Slot): Temperatura de aplicación

Ranura (Slot): Epoca de aplicación

OTRA INFORMACIÓN

Ranura (Slot): Nombre comercial

Ranura (Slot): Formulación

Ranura (Slot): Toxicidad

Ranura (Slot): Dosis de aplicación

Ranura (Slot): Costo de aplicación

Los marcos de referencia se pueden encadenar entre sí formando jerarquías, lo que hace más compacto el conocimiento y permite su representación de una forma más profunda (Sánchez y Beltrán, 1990).

2.1.17. Herramientas de desarrollo de los sistemas expertos

La experiencia en la construcción de sistemas expertos enseña que una de las decisiones más importantes a la hora de desarrollar uno de tales sistemas es la elección de una herramienta de desarrollo adecuada. Una herramienta de desarrollo es un programa o conjunto de programas que facilita la creación de otros programas.

En el desarrollo de un sistema experto se pueden utilizar tres tipos de herramientas: lenguajes genéricos, lenguajes específicos y los sistemas «shells ó conchas» o ambientes de construcción. En la Figura 3 se ilustra un espectro de las herramientas de desarrollo para los sistemas expertos según su facilidad de uso y tiempo de desarrollo. Los lenguajes genéricos son los más difíciles de usar y se deberían elegir como última alternativa; dentro de los lenguajes específicos Prolog es más fácil que Lisp, Smalltalk es un lenguaje orientado a objetos relativamente fácil de usar y, por último, los shells ó conchas son los más sencillos de utilizar. Actualmente la mayoría de los sistemas expertos que se desarrollan en la agricultura son realizados con shells o ambientes de trabajo.

Es necesario agregar que los SE's realizados en cualquiera de los lenguajes o sistemas de ambiente señalados, pueden llevar añadidos o adjuntos programas externos pero enlazados al SE y que por lo general tienen por objeto realizar tareas de cálculo matemático o estadístico que les son pedidos como variables externas por el mismo SE y que una vez calculadas por el o los módulos externos, le son devueltas al sistema para que éste siga su proceso.

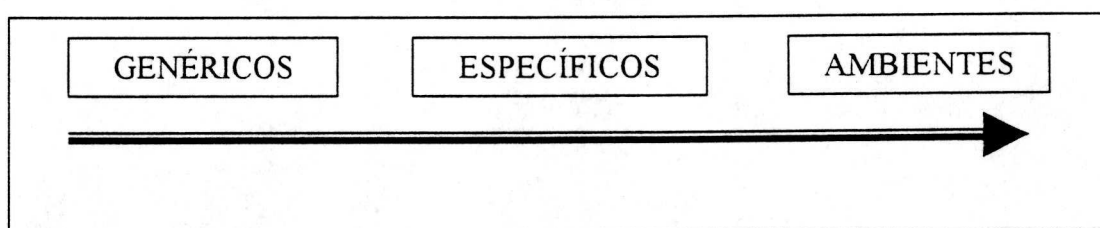


Figura 3. Facilidad de uso de las distintas herramientas utilizadas en el desarrollo de los sistemas expertos.

Toda vez que el sistema experto desarrollado para el presente trabajo tiene esta particularidad, es decir, posee un módulo externo, cabe mencionar entonces entre las herramientas de desarrollo indirecto de los SE's, las aplicaciones que sirven para elaborar estos módulos externos. Entre estas herramientas cabe mencionar dos tipos:

1. lenguajes de programación de uso general y de naturaleza procedural o tradicionales como lo son Basic, Fortran, Pascal o C y 2. Sistemas de desarrollo de aplicaciones multimedia basados en lenguajes orientados tanto a objetos como a eventos, como son los casos de Visual Basic, Visual C y Delphi. Los segundos son no solo más fáciles de usar que los primeros, sino que permiten agregar a las aplicaciones desarrolladas elementos multimedia (color, textos, imágenes, sonido, video) que no tienen los lenguajes convencionales.

Dado que el SE desarrollado para el presente trabajo fue elaborado, en su parte principal, mediante un shell o ambiente de desarrollo de SE's, se mencionan a continuación algunas características de estos sistemas.

2.1.18. Ambientes de desarrollo de SE's o shells

Un shell o concha como a veces se les denomina no es mas que un sistema experto con su motor de inferencia e interfase con el ingeniero del conocimiento y con los usuarios, el cual carece de una base de conocimientos, pero que posee las facilidades para elaborar tales bases para crear SE's especialistas en cualquier temática. Los shells han contribuido notablemente al auge de los sistemas expertos al simplificar y acelerar el desarrollo de los mismos con la eliminación de los problemas de programación y, por consiguiente, de rápido uso por el ingeniero del conocimiento y de fácil uso para los usuarios no familiarizados con la informática. Actualmente existe en el mercado informático una amplia gama de shells que pueden ser utilizados en todo tipo de ordenadores. En el Cuadro 2 se muestran algunos de los más utilizados (González y Recio, 1996).

Básicamente se dividen en shells basados en reglas y los basados en inducción, aunque también existen sistemas híbridos. En los shell basados en reglas la base de conocimientos esta compuesta por reglas de producción. Las reglas se introducen en el

sistema a través de un tratamiento de texto muchas veces incorporado en el mismo ambiente. Los ambientes basados en inducción permiten construir un sistema experto dando al programa una serie de ejemplos.

La mayoría de los shells están escritos en lenguajes de alto nivel como Pascal o C, otros tienen conexiones con otros productos software, lo que es muy deseable al igual que la existencia de una buena interfase con el usuario.

2.1.19. Fases de desarrollo de un sistema experto

Por lo general el desarrollo de un sistema experto suele ser similar al de un programa informático convencional. La diferencia fundamental entre el desarrollo de un sistema experto y un programa convencional radica en el proceso de adquisición del conocimiento.

En el desarrollo de un SE se contemplan dos tipos de personas, que deben estar en estrecha colaboración, como son el/los ingeniero/s del conocimiento y el/los expertos/s en el tema considerado. El ingeniero del conocimiento es el especialista en el proceso de extracción del conocimiento de los expertos, establecimiento de la base de conocimientos e implementación del sistema en la computadora. En algunas ocasiones el ingeniero del conocimiento y el experto son una misma persona, caso muy habitual en agricultura.

El desarrollo de un sistema experto se puede sintetizar en una serie de pasos esenciales que se mencionan a continuación y que posteriormente, en el capítulo de Materiales y Métodos se explica como se aplicaron para el desarrollo del sistema experto que se reporta en el presente trabajo:

Cuadro 2. Algunos ambientes de desarrollo de SE's
o shells que han sido utilizados en la agricultura.

Ambiente	Tipo de computadora	Representación del conocimiento
ADVISOR	Apple	Reglas
EXPERT EASY	PC	Inducción
EXSYS	PC	Reglas
EXPERT SYSTEM	PC	Reglas
INSIGHT	PC	Reglas
KES II	PC	Reglas
NEXPERT	PC, Mac	Reglas
OPS5+	PC, Mac	Reglas
XSYS	PC	Reglas
EXPERTOP55	Mac	Reglas
GURU	PC	Reglas
ARIES	PC	Reglas

- Análisis del problema.
- Establecimiento de la base de conocimientos.
- Elección de la herramienta de desarrollo.
- Desarrollo de un prototipo.
- Refinamiento y ampliación.
- Validación del sistema.
- Mantenimiento.

2.1.20. Algunos sistemas expertos desarrollados para la agricultura

2.1.20.1. En el proceso de producción agrícola.

En esta parte se exponen diversas aplicaciones de los sistemas expertos en el sector agrícola.

La agricultura es una actividad de producción, cuyo objeto son los cultivos. El ciclo productivo está condicionado por el hecho de estar sometido a las fases biológicas de los cultivos, y al hecho de ser necesario proporcionarle a las plantas los servicios necesarios para su desarrollo, dando lugar así a un proceso técnico-administrativo paralelo al proceso biológico. Las operaciones de cultivo son un conjunto de acciones que se realizan en el proceso técnico del cultivo: barbechar, sembrar o plantar, abonar, protección de cultivos, recolección y comercialización.

La decisión de las operaciones de cultivo a realizar, su definición, así como su planificación, son tareas de vital importancia en toda explotación agrícola. Son muchas las combinaciones de operaciones que se pueden realizar para conseguir un efecto determinado. Las decisiones tomadas inciden de manera importante en la cantidad y calidad de la cosecha.

En estas fases de planificación de tareas y toma de decisiones, son de particular aplicación por parte del agricultor o de los técnicos a su servicio, programas de cómputo realizados bajo diversas tecnologías, y que ayudan al diagnóstico de qué hacer, cuando hacerlo y cómo hacerlo. Entre estas tecnologías o tipos de programas están las siguientes: programas de cálculo numérico tradicional; programas de simulación de sistemas; programas de investigación de operaciones -- programación lineal, por ejemplo --; programas de manejo de bases de datos y programas de inteligencia artificial, como es el caso de los sistemas expertos.

Las fases del proceso técnico en las que mayormente se han realizado sistemas expertos en el mundo, están las siguientes (González y Recio, 1996):

Selección de la especie agrícola a cultivar y decisión de la superficie a sembrar.

Configuración de parques de maquinaria.

Gestión o administración de explotaciones.

Protección de cultivos.

Riego y fertilización.

2.1.20.2. Relación de algunos sistemas expertos en la agricultura.

Protección vegetal.

POMME

Facilita información sobre las plagas y manejo del cultivo del manzano. El sistema ofrece a los agricultores conocimientos sobre fungicidas, insecticidas, daños por heladas y sequías. Información externa como datos atmosféricos incluyendo predicciones y síntomas del cultivo, son utilizados por el sistema para generar recomendaciones sobre el manejo del cultivo.

PLANT/DS

Se utiliza para el diagnóstico de las enfermedades de la soya y daños producidos por insectos. Adicionalmente utiliza datos externos, como condiciones atmosféricas, condiciones de crecimiento y síntomas de la planta.

PLANT/TM

Es utilizado para la identificación de malas hierbas en césped. El sistema contiene reglas para la identificación de 39 especies de malas hierbas encontradas normalmente en césped. Como entrada se requiere la contestación a una serie de preguntas sobre las características taxonómicas de las malas hierbas.

COMAX

Provee información sobre el manejo integrado del cultivo de algodón. Requiere información externa como datos atmosféricos, parámetros físicos del suelo, niveles de fertilidad del suelo y cierta información sobre el manejo de plagas. Está integrado con el modelo de simulación GOSSYM que simula el crecimiento de las plantas de algodón.

TOM

Desarrollado en Francia, sirve de ayuda al diagnóstico de las enfermedades del tomate y su tratamiento.

CONSELLOR

Se ocupa del control de las enfermedades del trigo de invierno. Calcula los riesgos de enfermedades antes de cada estación. Identifica en cada estación los problemas y proporciona recomendaciones.

ACES

Proporciona información sobre la identificación de 22 enfermedades en 16 tipos de trigo y 13 enfermedades en 23 tipos de cebada.

CALEX-COTTON

Integra y organiza las decisiones a tomar en algodón respecto a varios aspectos: control de plagas, riego, fertilización, etc.

CALEX-PEACHES

Integra y organiza las decisiones a tomar en melocotonero respecto a varios aspectos: control de plagas, riego, fertilización, etc.

CAES

Ha sido desarrollado para la identificación y control de los pulgones más importantes de cereales en España. Se puede consultar a través de Videotext.

NERISK

Se ha desarrollado para evaluar el impacto de los pesticidas sobre artrópodos predadores y parasitoides beneficiosos. Ayudando a la toma de decisiones sobre la integración de controles químicos y biológicos.

CHEX

Recomienda herbicidas para malas hierbas de cereales.

SIEXMAL

Ayuda a la identificación de las plántulas de malas hierbas que crecen en cereales en España. Contiene reglas para la identificación de 45 especies de malas hierbas.

WEEDEX

Ha sido desarrollado para la identificación de malas hierbas en su fase inicial, contemplando un total de 80 malas hierbas.

HERBASYS

Este sistema se utiliza para predecir los problemas que pueden ocasionarse después del uso de herbicidas.

PEST

Ha sido desarrollado para la identificación de insectos en varios cultivos y su control por medios químicos.

POMI

Se utiliza para el manejo integrado de plagas en manzano.

SIRATAC

Ayuda a los cultivadores de algodón ha utilizar racionalmente los insecticidas.

QOSY

Permite proteger los cultivos de soya contra la larva de *Heliothis zea* . El sistema requiere para su funcionamiento, información sobre las condiciones ambientales y los resultados del muestreo de larvas, ofreciendo recomendaciones sobre la utilización de diferentes productos pesticidas.

SOYBUG

Diseñado para ayudar al control de cuatro plagas de insectos en soya. También produce recomendaciones sobre el tipo de herbicida que debería ser utilizado.

EPINFORM

Fue desarrollado para predecir los efectos producidos por *Puccinia striiformis* y *Septoria nodorum* sobre la producción de trigo.

GRAPES

Ayuda en la toma de decisiones en viticultura y tiene en cuenta los siguientes problemas: enfermedades, insectos, malas hierbas y fertilización.

POTATOES

Es un sistema integrado utilizado para controlar al escarabajo de la patata.

HOPPER

Diseñado para el control de insectos en arrozales.

SEPV

Esta compuesto por una serie de 16 sistemas expertos que sirven de ayuda al diagnostico de plagas, enfermedades y otros problemas en diferentes cultivos.

SMART SOY

Evalúa los daños en la producción de soya producidos por cuatro tipos de insectos recomendando el tratamiento en función del estado del cultivo y el nivel de la plaga. Se utiliza en conjunción con el simulador de cultivos

AWEED

Sistema desarrollado para el control de las malas hierbas acuáticas.

Producción Animal

MAMMITRON

Ayuda al diagnóstico epidemiológico de las infecciones intramamarias en bovinos. Es posible el acceso via Videotext.

FOURRAGR PLUS

Optimiza el uso del pienso teniendo en cuenta diferentes restricciones. Es posible el acceso vía Videotext.

ZHEJIANG

Proyecto de mejora genética de los gusanos de seda.

DXMAX

Reconoce problemas de manejo en la producción lechera y hace recomendaciones para reorganizar y expandir la producción.

Agroalimentarios

COO KSIM

Se utiliza para el procesamiento termal de los alimentos.

SEXIA

Identificación del tipo de aceite de acuerdo con la variedad de la aceituna y/o la denominación de origen.

RUYEX

Monitoriza y diagnostica diferentes problemas en el proceso de elaboración de quesos.

SIAMOND SYSTEM

Realiza la supervisión y control de fabricas cervceras.

Gestión y planificación.

FINDS

Selecciona maquinaria que puede mejorar la rentabilidad de las empresas agrícolas.

FinARS

Produce una evaluación sencilla y rápida del estado financiero de la empresa agrícola.

GRAIN MARKETING ADVISR

Determina diferentes alternativas de mercado y ayuda al productor de grano en la obtención de la estrategia óptima. Como datos de entrada se requiere información sobre almacenamiento, tendencia de los precios, etc.

COFINE

Análisis económico y financiero de los resultados de producción obtenidos.

Medio Ambiente.

PLANTING

Predice la erosión del suelo teniendo en cuenta diferentes condiciones físicas y cultivos plantados.

GUY

Simula la erosión del suelo causada por el agua.

FARMPLAN

Ayuda al desarrollo de planes agrarios-forestales que permitan la conservación del suelo agrícola.

TSDSYS

Selecciona tratamientos para los residuos y su reciclaje.

COHO

Ayuda a la evaluación de la vegetación de la ribera de los ríos, para la conservación de los recursos naturales incluyendo el hábitat y el agua.

Producción Vegetal.

OPTICO

Se utiliza para la optimización de CO₂ en invernaderos.

MISTING

Para el control de invernaderos.

ZEA

Ayuda a la toma de decisiones sobre el cultivo del maíz: protección, riego, fertilización, etc.

CROSS

Describe el potencial genético de semillas híbridas.

VARIMAS

Ayuda a la elección de variedades de maíz teniendo en cuenta las restricciones ambientales. Se puede acceder a este sistema a través de del servicio Videotext.

LATIS

Realiza análisis económicos para la producción de alfalfa.

CROPES

Este sistema está orientado a la selección de cultivos utilizando variables ambientales basadas en diferencias de suelos, climas, técnicas de cultivo y recursos disponibles. Da recomendaciones sobre aplicación de fertilizantes.

Esta relación de sistemas expertos ha sido formada con casos tomados de Gonzáles y Recio, 1996 y de Internet.

2.1.21. La fertilización en naranjo

En México la naranja es el frutal más importante, tanto por la superficie cultivada, como por el consumo *per capita* y por el monto producido.

Veracruz es el principal productor de naranja, ocupando el 45.73% de la superficie total cultivada y aportando el 48.29% de la producción nacional. Continúan en importancia, San Luis Potosí con el 11.76% y Nuevo León con el 10.0% de la producción.

En el norte del estado de Veracruz los principales municipios productores son: Álamo con 40,160 ha., Martínez de la Torre con 18,509 ha. y Tihuatlán con 12 993 ha.; con un aporte de 26.04%, 12% y 8.42% de la superficie estatal, respectivamente (SAGAR, 1997).

El principal problema que enfrentan los productores de naranja en algunos de los estados productores del país, es el nulo o inadecuado uso de fertilizantes, lo que hace necesario realizar investigaciones y otro tipo de trabajos que permitan obtener una recomendación de fertilizantes, tratando de dar solución a los problemas de índole nutricional y de esta manera aumentar los rendimientos por unidad de superficie y la calidad de las cosechas.

2.1.21.1. Mecanismos de acceso nutricional.

La movilidad de nutrientes en el suelo depende de la concentración de estos en la solución, de la naturaleza de los nutrientes y estado hídrico del suelo, entre otros factores importantes. En cambio, la absorción nutricional depende de la concentración de iones en la superficie de la raíz, de su capacidad de absorción y demanda de la planta. La absorción es un proceso dinámico en el cual los nutrientes deben ser continuamente reemplazados en la solución del suelo, desde la fase sólida o tomados directamente de la fase intercambiable del suelo (Barber, 1984).

En el sistema suelo, los nutrientes se mueven hacia las raíces de las plantas por flujo de masas, difusión e interceptación radical.

Flujo en masas. Los nutrientes en el suelo pueden ser transportados por dos mecanismos principales, por flujo de masas y difusión. El flujo de masas juega un papel importante para presentar altas concentraciones de nutrientes en la solución del suelo, aun bajo condiciones de alta transpiración cuando una cantidad considerable de agua es removida hacia las raíces transportando solutos (Mengel y Kirkby, 1982)

Fageria *et al.* (1991) definen el flujo de masas como el movimiento hacia la raíz de nutrientes disueltos en el agua del suelo, mientras que Mengel y Kirkby (1982), mencionan que este proceso ocurre cuando los solutos son transportados hacia las raíces de las plantas en un flujo convectivo de agua generado por la transpiración. Aunque

ambos coinciden, los nutrientes llegan a alcanzar la raíz dependiendo de su concentración en la solución del suelo, velocidad de flujo de agua, proporción de agua transportada y el consumo de agua por la planta

Los niveles de un nutriente en particular de la solución del suelo cercana a la raíz puede incrementarse, decrecer o permanecer igual, dependiendo del balance entre la cantidad suministrada a la raíz por flujo de masas y la capacidad de absorción de la planta. Además, menciona que la velocidad del movimiento de los iones en la raíz por flujo de masas depende de la velocidad de absorción de agua, lo cual es afectada por la especie, clima y el nivel de humedad del suelo, pues la transpiración promueve el flujo de agua durante el día (Barber, 1984).

Difusión. La difusión puede ser definida como el movimiento de nutrientes desde una zona de alta concentración a una zona de baja concentración. Cuando el suministro de nutrientes no es suficiente por flujo de masas e interceptación, se crea un gradiente de concentración y los nutrientes se mueven por difusión (Fageria *et al.*, 1991).

Cuando el suministro a la raíz de un ion en particular inicia por interceptación radical y después el flujo de masas no es igual o excede la cantidad absorbida por la raíz, la concentración de este ion en la superficie radical se reduce y un gradiente normal de concentración es establecido en la raíz. Porque un gradiente de concentración existe, la difusión del ion hacia la raíz es debida al movimiento de las partículas (Barber, 1984), además que la distancia para difundir nutrientes del suelo hacia la raíz, se encuentra normalmente en el rango de 0.1 a 15 mm.; por lo que, sólo los nutrientes que se encuentran en esta zona contribuyen al suministro radical por difusión (Barber, 1984).

Interceptación radical. Un importante problema en la disponibilidad de nutrientes es que necesitan ser transportados hacia las raíces, entrando en contacto con estas o que las raíces entren en contacto a través de su crecimiento en el suelo (Mengel y Kirkby, 1982). Por esta razón, Barber (1984) usa el termino "interceptación radical"

para describir los nutrientes que no tienen movimiento para su absorción y que la cantidad de nutrientes suministrados mediante este mecanismo son tomados según la cantidad de suelo explorado por el volumen de raíz.

Mediante el crecimiento de raíces, éstas entran en contacto directo con las partículas de suelo y los nutrientes. La interceptación de nutrientes depende de la densidad de raíces y por ende del volumen de suelo explorado, de su morfología y de la concentración de nutrientes. La cantidad de raíces presente por unidad de volumen de suelo puede ser limitada en términos de área superficial, longitud o volumen de raíz, y la densidad radical varía según las propiedades del suelo, la especie y prácticas de manejo (Fageria *et al.*, 1991).

La concentración de nutrientes es limitada por el volumen de suelo, cuando el flujo difundido a las raíces de las plantas es determinado. De aquí, cuando la densidad de volumen de suelo se incrementa cerca de la raíz, la concentración de nutrientes disponible por unidad de volumen de suelo es mayor. Este incremento resulta en un amplio gradiente de concentración para la difusión de nutrientes a la raíz (Barber, 1984).

Generalmente, la cantidad de nutrientes interceptados por las raíces directamente, es pequeña en comparación con el total de nutrientes demandados. Por esta razón, el flujo de masas y difusión, son procesos mucho más importantes que la interceptación radical por los cuales la planta recibe nutrientes (Mengel y Kirkby, 1982).

2.1.21.2. Funciones de los nutrientes en las plantas.

Son dieciséis los elementos considerados esenciales para el crecimiento de las plantas. De estos, once de ellos se han encontrado como deficientes en el cultivo de los cítricos.

A continuación se muestran los síntomas de deficiencias de elementos que pueden afectar el crecimiento y desarrollo de los cítricos.

Nitrógeno. El nitrógeno tiene gran influencia sobre el crecimiento y rendimiento al igual que otros elementos nutritivos; es un constituyente de aminoácidos, proteínas, clorofila, alcaloides, amidas y otros compuestos importantes en el metabolismo de las plantas (Wutscher y Smith, 1993). Debido a la importancia que tiene el nitrógeno en el metabolismo de las plantas y en las sustancias antes mencionadas, es el elemento que más influye sobre el crecimiento, floración y producción de los cítricos.

La falta de nitrógeno determina un desarrollo débil, vegetación retardada, hojas escasas, pequeñas y cloróticas, de un verde pálido (Lalatta, 1988). La producción es más escasa, tanto en el menor cuajado de frutos como en el menor tamaño que llegan a alcanzar. Y en general, las plantas son raquíticas y amarillas, pero en casos graves de deficiencia de nitrógeno las hojas se vuelven marrones y mueren (Tisdale y Nelson., 1985).

Cuando la deficiencia es aguda, disminuye el crecimiento vegetativo. En el follaje se observa primeramente, una pérdida uniforme de clorofila de las hojas viejas y debido a las funciones del nitrógeno, su deficiencia conlleva a una interrupción del crecimiento vegetativo y un bronceado o amarillamiento general del follaje, seguida por un raquitismo de ramas y finalmente cesa por completo la floración y la fructificación. Los síntomas foliares más característicos son disminución de tamaño de las hojas y amarillamiento en las nervaduras; las hojas entran precozmente en senescencia y caen prematuramente en gran cantidad (Chapman, 1968).

Los árboles continuamente deficientes en nitrógeno son pequeños, de forma asimétrica y con ramas cortas e irregulares; las hojas son pequeñas y de reducido ángulo de inserción. La producción de fruto es altamente disminuida. Los frutos tienden a ser suaves y presentan bajas concentraciones de ácido cítrico, tienen cáscara suave, pueden

ser pálidos y su tamaño puede disminuir. La succulencia puede ser realmente incrementada, pero el contenido de sólidos solubles totales no son muy afectados; al igual que la calidad en general.

Los flujos florales de verano en árboles de naranja deficientes en nitrógeno, muestran hojas amarillas, puntiagudas, estrechas y semienrolladas y que producirán pocos frutos (Chapman, 1968).

Fósforo. El fósforo es un componente de ciertas enzimas, nucleoproteínas, y lecitina, los cuales son esenciales para las funciones vitales de las plantas. La adenosin trifosfato (ATP) y otros productos fosforilados están involucrados en el funcionamiento normal de todas las células (Smith, 1966), que participan en la transferencia de energía; además, en funciones importantes como un constituyente de los ácidos nucleicos en moléculas de DNA y RNA y, de fosfolípidos en membranas y en la regulación del metabolismo de carbohidratos. Los compuestos de fósforo son fácilmente traslocados y concentrados en tejidos de metabolismo activo (Wutscher y Smith, 1993).

Las hojas y tallos de las plantas deficientes en fósforo son, por lo general, pequeños y muestran una coloración verde rojiza, púrpura o bronceada. En deficiencias agudas suelen presentarse quemazones irregulares en los bordes de las hojas; la floración y la madurez de la plantas es retardada, produciendo frutos pequeños (López, 1978).

Las hojas de los árboles de cítricos toman inicialmente un color bronceado mate y posteriormente aparecen necrosis en las puntas y márgenes de éstas, cayendo prematuramente. Cuando la deficiencia es severa, se produce una reducción marcada de la floración. Las brotaciones son débiles, apreciándose una tendencia a la desecación de las puntas de los brotes.

Aunque la deficiencia de este elemento no es común en los cítricos, pero en caso de presentarse, los primeros síntomas aparecen en los frutos, los cuales presentan el corazón o eje central abierto, corteza más gruesa, caída de frutos en casos severos,

menos contenido de jugo y de sabor muy ácido, pero su tamaño puede ser ligeramente incrementado, probablemente debido al decrecer el rendimiento y tener menor cantidad de frutos por árbol; los frutos maduros se vuelven blandos y esponjosos, se caen antes de la cosecha cuando son deformes, el color y grosor de la cáscara puede aumentar, pero con menor contenido de zumo y la pulpa es estropajosa y con alto contenido de vitamina C (Chapman, 1968).

Potasio. El potasio participa en funciones de neutralización de aniones y estabilización interna de pH, activación de enzimas, síntesis de proteínas, fotosíntesis, en procesos de extensión celular, funciones estomatales, movimientos násticos y en el transporte de metabolitos. El potasio es altamente móvil a través de las células del xilema y floema, tienen tendencias a concentrarse en el citoplasma y vacuólas, participando también en funciones metabólicas en el crecimiento y división celular de tejidos jóvenes y está relacionado con la formación de algunos ácidos orgánicos y en la hidratación de tejidos (Wutscher y Smith, 1993).

La deficiencia de potasio provoca desecación del margen foliar y de los ápices vegetativos, la formación de frutos más pequeños, menos coloreados y menos aptos para la conservación (Baldini, 1992), además que las hojas deficientes son de consistencia coriácea y se necrosan los ápices vegetativos. Además, los nuevos crecimientos son débiles, pequeños y con el desarrollo de una clorosis amarillenta a bronceada (Wutscher y Smith, 1993).

Los síntomas de deficiencia en cítricos se manifiesta por una reducción del vigor vegetativo y las hojas se enrollan y arrugan, apareciendo unas zonas amarillas difusas en el limbo en bandas transversales, sin que se aprecien quemaduras en las mismas, aunque si pueden formarse manchas de goma. La aparición de nuevas brotaciones hace que esta sintomatología sea más evidente en las hojas viejas, ya que el potasio emigra de ellas hacia los nuevos órganos. Las brotaciones son débiles, con hojas de tamaño inferior, que caen con facilidad y en casos graves, los brotes pueden llegar a secarse.

Los frutos de árboles en cualquier estado de deficiencia son pequeños y se colorean tempranamente. La textura de la cáscara es suave y de piel delgada. Tienen buen porcentaje de jugo y la calidad interna no se ve seriamente afectada; el ácido es un poco menor comparado con los frutos bien abastecidos de potasio. El rendimiento no es muy disminuido, pero la caída de fruta puede ser marcada y el arrugamiento del fruto ser grande cuando el potasio es deficiente (Chapman, 1968). La cantidad de zumo en la cáscara suele ser alta y los frutos tienen una marcada tendencia a pudrirse fácilmente y las raíces fibrosas de los árboles son cortas y gruesas (Legaz y Primo, 1990).

Magnesio. El principal papel del magnesio es formar parte central de la molécula de clorofila. Pero solo una pequeña parte de magnesio en la planta esta destinada para la clorofila, sin embargo, su papel clave lo lleva a cabo en la regulación del pH celular y del balance de cationes y aniones. Y tiene una esencial función como un elemento de enlace para la agregación de subunidades de ribosomas en la síntesis de proteínas; además, de ser requerido por muchas enzimas, tales como las fosfatasas, ATPasas y carboxilasas (Wutscher y Smith, 1993).

Las plantas deficientes en magnesio presentan una clorosis que inicia en las hojas viejas, caracterizada por un amarillamiento entre las nervaduras a lo largo del eje central de la hoja, de forma tal que hacia el ápice cada vez menor zona a ambos lados del eje permanece verde, formando por ello, la parte que se mantiene verde una V invertida (Wutscher y Smith, 1993), sobre la base de las hojas viejas, cuando la deficiencia es aguda. Los frutos son pequeños, bajos en sólidos solubles, ácido total y vitamina C. En naranja, hay una marcada palidez de pulpa y cáscara. Los rendimientos son reducidos, pero es más marcado en variedades de frutos con semilla (Chapman, 1968)

Azufre. Este elemento es tan importante en las funciones metabólicas y su participación en la producción de cítricos, tanto como cualquier otro de los mencionados en este apartado. Se le suele usarlo como mejorador de suelos calcáreos y

particularmente en mejorar las condiciones de pH del suelo. El objetivo es bajar la reacción del suelo tendiendo a la neutralidad y favorecer la disponibilidad de algunos nutrientes, principalmente elementos menores.

Hierro. El hierro está muy relacionado en la respiración, síntesis de clorofila, fotosíntesis y en la fijación de nitrógeno atmosférico; participa en el metabolismo de las proteínas y en la reducción de los nitratos. El hierro es necesario para el mantenimiento de la clorofila en las plantas y como componente de transportadores heme y noheme y de muchas enzimas de las plantas, tales como el citocromo oxidasa (transferencia de electrones) y citocromo (etapa final de la respiración), además requerido para la producción de energía, pero la función común más reconocida es la reducción del oxígeno a agua en la respiración (Tisdale y Nelson, 1985).

La deficiencia de hierro es más pronunciada en brotes terminales. Es descrita como una fina red verde sobre un fondo amarillo del resto de la hoja. En deficiencias agudas, el crecimiento se restringe, ocurre la muerte regresiva de ramas (Wutscher y Smith, 1993), se extiende una venación apenas distinguible en el cual las hojas se vuelven casi amarillas o color marfil y tal vez con un matiz verde en la parte basal de la vena principal de la hoja (Chapman, 1968)

La calidad de fruto parece no ser severamente afectada. Generalmente los frutos de árboles afectados con este desorden son pequeños y tienden a ser lisos. El total de sólidos es reducido, pero el ácido se incrementa un poco. Las naranjas próximas a madurez pueden ser poco coloreadas (Chapman, 1968).

Cobre. El cobre es un constituyente de la plastocianina del cloroplasto, además forma parte del transporte de electrones que conectan el fotosistema I y II, participa en el metabolismo de proteínas y carbohidratos; forma parte de las enzimas (citocromo oxidasa, ácido ascórbico oxidasa y polifenol oxidasa) que reducen los átomos del oxígeno.

Los síntomas característicos de la deficiencia de cobre son la aparición de un moteado clorótico caracterizado por manchas intervenales en las hojas de brotes terminales, estos síntomas son más pronunciados y abundantes en el lado soleado del árbol. Las hojas son pequeñas, drásticamente reducidas, angostas, puntiagudas y cloróticas; debido a lo anterior, las ramas en crecimiento, los entrenudos cortos y las hojas de tamaño pequeño aparentan una condición de arrosetamiento. Los rendimientos son reducidos cuando la deficiencia es severa, el tamaño de los frutos disminuye, pueden ser deformes y con menor cantidad de vitamina C en deficiencias agudas (Chapman, 1968).

Boro. El boro es esencial para las plantas superiores, se cree que funciona facilitando el transporte de azúcares a través de las membranas, siendo probable que regule la actividad de las deshidrogenasas 6-fosfogluconato y estar involucrado en el metabolismo de las auxinas, pero el papel esencial está en su participación en la germinación del polen, elongación, crecimiento y estabilidad del tubo polínico; además de intervenir en la síntesis de una de las bases para la formación del RNA (uracilo), en actividades celulares (división, diferenciación, maduración, respiración, crecimiento, etc.) y en controlar la cantidad de fósforo incorporado a los nucleótidos, síntesis de aminoácidos y proteínas (Tisdale y Nelson, 1985).

Los síntomas visuales de la falta de boro son la deformación de hojas, entrenudos cortos, muerte de ápices y brotes, aparición de yemas múltiples y corchosas; además aparecen derrames de goma en brotes tiernos. Los frutos son duros, deformes, pequeños con bolsas de goma, con decoloraciones parduscas en el albedo y con cáscaras costrosas. Presentan descomposición de la cáscara y abscisión de frutos jóvenes que afectan el rendimiento; pero en deficiencias severas se presentan bolsas de goma en el interior de los gajos y en la parte cercana al centro de la fruta; también permanecen pequeñas, se parten y caen antes de alcanzar la madurez. Los limones carecen de jugo y pueden sufrir alteraciones en su forma cuando tienen deficiencias de boro (Chapman, 1968).

Manganeso. Es un micronutriente esencial que está involucrado en los procesos de oxidación-reducción en el transporte de electrones del sistema fotosintético. Es esencial en el fotosistema II para la fotólisis, actúa como un enlace para el ATP y activa la AIA oxidasa y activa cierto número de enzimas, tales como el piruvato carboxilasa.

La deficiencia de manganeso se caracteriza, igual que la de zinc, en una decoloración de los espacios intervenales, pero en este caso las zonas cloróticas quedan de un color verde claro, sin el contraste amarillo-verde de la deficiencia de zinc. Tanto brotes jóvenes y maduros muestran un patrón sintomático en hojas. Las jóvenes tienen una fina red de venas verdes y las maduras un moteado intervenal.

Las hojas con manchas de color verde claro entre las nervaduras, generalmente es más pronunciada en el lado opuesto al sol, tienden a enrollarse y la deficiencia en general tienen poca influencia sobre los rendimientos (Chapman, 1968).

2.1.21.3. Técnicas de análisis nutrimental usadas en fruticultura.

La combinación del análisis foliar, de los síntomas visuales y del análisis de suelos puede informar sobre el estado nutrimental de los agrios e incluso de las posibles causas de los trastornos nutritivos. Además, utilizando los tres métodos de análisis se puede dar una solución bastante aproximada para el diagnóstico de los trastornos nutrimentales de los agrios (Chapman, 1961). Sin embargo, el mejor método de diagnóstico es el que recomiende una fertilización solo cuando sea probable una respuesta económica directa (Kenworthy, 1973)

Sintomatología visual. La sintomatología visual es un método para diagnosticar el estado nutrimental de la planta, por las manifestaciones que está presente y que se observan visualmente. López y López (1978), mencionan que no es un buen

medio de juzgar las necesidades de fertilizante, sin embargo, es útil para distinguir los síntomas nutrimentales en las plantas. Por su parte Chapman (1961) dice que las características foliares por sintomatología visual, generalmente son buenos, de acuerdo a los efectos por deficiencia y exceso, pero que esto suplementado con análisis foliar y de suelo puede ser considerado como altamente útil.

Los síntomas visuales pueden ser usados en el diagnóstico del estado nutrimental de los cítricos. Los cuales, en estados moderados a agudos de las deficiencias de cobre, hierro, magnesio, manganeso y zinc se pueden diagnosticar con precisión, con ayuda de la sintomatología visual y por medio de una persona experimentada, pero que en los demás casos hay que recurrir al análisis de plantas y de suelo. Además, los síntomas visuales son también útiles para diagnosticar en muchas ocasiones, cuando se trata de disturbios causados por enfermedades, daños por insectos, por clima u otros factores (Chapman, 1961).

Análisis de suelo. Todo suelo provee a la raíz de un ambiente con propiedades únicas que afectan la disponibilidad de aire, agua y nutrimentos. Por tanto, el análisis de suelo es de gran interés para la identificación de los estados intermedios, en el exceso de salinidad, en resolver o confirmar el diagnóstico cuando no son suficientes ni los síntomas visuales ni el análisis foliar y cuando se quiere averiguar la causa de los trastornos nutritivos (Chapman, 1961)

Hauser (1980), menciona que el propósito del análisis de los suelos son evaluar la fertilidad del suelo, formular recomendaciones relativas a los fertilizantes, determinar las necesidades de un cultivo antes de su implantación y preveer la respuesta en el rendimiento de un cultivo tras la aplicación de fertilizantes. Por su parte, (Chapman, 1961) menciona que el análisis de suelo puede ser de gran utilidad para contribuir a esclarecer las causas de las deficiencias, además para orientar la corrección de las mismas.

Análisis foliar. El análisis foliar se basa en la premisa de que el comportamiento de la planta está relacionada con las concentraciones de elementos esenciales en el tejido de la hoja. Las bases fisiológicas del análisis foliar depende de dos procesos generales: a) la absorción y distribución de los minerales por la planta y b) una relación cuantitativa entre los nutrimentos absorbidos y el crecimiento de la planta.

El análisis foliar es una herramienta sumamente eficaz en la detección de deficiencias y excesos de elementos minerales. El análisis foliar incluye consideraciones de colecta de la muestra de planta, preparación de las muestras para su análisis, interpretación analítica de resultados y las recomendaciones (Chapman, 1961)

Por su parte Kenworthy (1973), menciona que es útil el uso del análisis foliar como guía de fertilización en frutales, pero no esencial y que el principal uso del análisis foliar ha sido y continua siendo, confirmar la presencia de una deficiencia nutrimental y la respuesta a la aplicación del fertilizante.

El análisis foliar es útil para diagnosticar o confirmar síntomas visibles, identificar problemas de hambre oculta, localizar área con deficiencias incipientes, identificar si los nutrimentos aplicados fueron tomados por las plantas, ayudar a entender las funciones interna de las plantas y sugerir pruebas adicionales que ayuden a identificar el problema. Antes de usar el análisis químico para diagnóstico foliar es necesario conocer los efectos de la edad, posición y etapa desarrollo de las hojas sobre la concentración de nutrimentos.

Muestreo en árboles. Los investigadores que efectúan análisis foliares para determinar la concentración de los elementos, siguen una técnica específica de muestreo, en la cual toman en cuenta principalmente las siguientes consideraciones: edad de la hoja, número de hojas por muestra, fecha de muestreo, tipo de rama, ubicación y altura de muestreo.

2.1.22. Técnicas de diagnóstico del estado nutrimental en frutales

Existen descritas en la literatura varias técnicas para determinar la concentración de nutrimentos en tejidos foliares, con el objeto de conocer en un determinado huerto de frutales, si los árboles están en estado de deficiencia, normalidad o exceso de nutrimentos, y de ahí derivar un curso de acción sobre la fertilización del huerto.

2.1.22.1. Técnicas cualitativas.

Las técnicas cualitativas como el diagnóstico visual tratan de caracterizar, mediante el estudio de la sintomatología del cultivo, las posibles alteraciones nutricionales del mismo. Utilizan grandes muestras, por lo que la precisión es bastante buena, pero el instrumento de análisis, "el ojo" hace que este método no sea cuantitativo. Sin embargo, la cuantificación puede mejorar con el uso de tablas de colores o escalas, así como medidores de clorofilas. Existen buenas colecciones de fotos de deficiencias que pueden ayudar a la interpretación (Bould 1961), pero estas fotos no existen para todos los cultivos ni elementos. La mayor desventaja es que cuando un síntoma aparece, la planta ha sufrido ya un daño irreversible que en mayor o menor medida va a reducir el rendimiento.

2.1.22.2. Técnicas cuantitativas. Diagnóstico foliar.

Entre las metodologías cuantitativas la más común y extendida es la que trata de determinar las concentraciones de los elementos en la hoja. El análisis foliar se basa en el hecho de que la hoja es el órgano metabólicamente más activo en la planta, por lo que las alteraciones nutricionales afectan en mayor medida a la hoja que a otros órganos (Cadahia y Lucena, 1998).

Para el análisis foliar se requiere que el muestreo y el procesado estén perfectamente normalizados según Métodos Oficiales de Análisis. Igualmente las normas o estándares de referencia, contra los que se habrán de comparar los resultados de los análisis, deben haberse tomado a partir de análisis efectuados en la misma forma.

La comparación de los resultados analíticos de las muestras con los estándares se realizan en distintas formas o técnicas. Algunas de ellas implican una mera comparación de entre la concentración de un solo elemento y su estándar (técnicas estáticas), pero otros toman en cuenta las relaciones entre elementos en forma múltiple (técnicas dinámicas). En el primer caso se encuentran los procedimientos tradicionales, el del Nivel Crítico (NC), el de Desviación del Óptimo Porcentual (DOP) y el del Rango de Suficiencia (RS). Este último que es el que más se utiliza de los dos, la comparación se hace ubicando el dato analítico en intervalos predeterminados donde se anota si el estado nutrimental es normal, deficiente o en exceso (Cadahia y Lucena, 1998).

Los métodos tradicionales presentan serias limitaciones ya que las concentraciones de los nutrimentos sufren fluctuaciones dependiendo de la posición de la hoja, de su edad, del clima al momento del muestreo, por balances de nutrientes y otros motivos.

Otros procedimientos, denominados genéricamente dinámicos, aunque tienen algunas de las limitaciones antes señaladas, si toman en cuenta las relaciones o balance entre los nutrimentos; entre ellos se cuentan los siguientes: Balance Nutriente Evolutivo (BNE), el DRIS desarrollado por Beaufils, el de Diagnósis Nutrimental Compuesto (DNC) (Cadahia y Lucena, 1998) y la técnica de Kenworthy de la que se hace aquí una descripción más detallada.

2.1.22.3. Técnica de diagnóstico de Kenworthy.

La técnica de Kenworthy es un procedimiento de cálculo para determinar si los árboles de un huerto están en condición deficitaria, normal o excesiva en cuanto a su contenido de macro y micro nutrimentos, determinando tal condición en forma directa a partir de las concentraciones de esos elementos reportados en análisis foliares (hojas y/o pecíolos). La ventaja fundamental de la técnica de Kenworthy consiste en que, si bien hace aquella determinación para cada nutrimento, lo hace tomando en cuenta implícitamente -- la existencia de sinergismos o antogonismos entre los elementos nutrimentales, pues es sabido que entre estos existen interacciones tanto en su absorción como en su efecto fisiológico en la planta. Su desventaja, si realmente lo es, estriba en que para su implementación (cálculo de ciertos estándares) se requiere de muestreos foliares en una colección representativa de árboles en un huerto o de una región donde se cultive la especie ó variedad de planta en cuestión si se desea que las inferencias sean válidas para cualquier huerto en tal zona (Kenworthy, 1961, 1973)

Sin embargo, la labor de determinación del valor de los estándares requeridos por la técnica se tiene que hacer por una sola vez y se pueden utilizar para muchos años, mientras las condiciones agroecológicas y las variedades de plantas no cambien radicalmente (Kenworthy, 1973).

Una vez precisados los estándares de la técnica, para una determinada especie y región, para determinar una condición específica de déficit, normalidad o exceso en un huerto en un momento adecuado del ciclo, lo único que se requiere es hacer un muestreo foliar en la plantación y un análisis químico que determine los contenidos de los nutrimentos. Estos contenidos se comparan con los estándares según el procedimiento propio a esta técnica y se concluye la condición específica del huerto en ese momento. Los estándares a los que se hace referencia párrafos arriba, son "la concentración óptima

de balance, S_i " y "el coeficiente de variación de la sección óptima, V_i " para cada nutriente N, P, K, Ca, etc., de los árboles más rendidores, de mayor calidad de la muestra tomada originalmente en la región frutícola.

La teoría detrás de la técnica de Kenworthy es, sucintamente, la siguiente: en los árboles de mayor rendimiento y/o calidad de un producto (frutos, por ejemplo), la concentración de cada nutriente y el balance entre ellos es el óptimo deseable desde los puntos de vista combinados fisiológico-agronómico-económico. Se deduce de lo anterior que: los árboles o huertos cuyas concentraciones de cada nutriente se apartan, hacia abajo o hacia arriba, de sus concentraciones óptimas S_i , más allá de lo correspondiente al valor de su coeficiente de variación V_i , se encuentran en condición de déficit o de exceso respecto a la condición de balance óptimo (Kenworthy, 1973).

Hechas las determinaciones Kenworthy (índices de balance B_i) para un huerto y una especie específica de frutal, se le puede comunicar al fruticultor la condición nutricional de su plantación, indicándole si esta es normal, leve o grave, para que él y/o sus asesores tomen una decisión al respecto.

Para realizar los cálculos que implican las determinaciones de ésta técnica, Kenworthy aporta una colección de fórmulas algebraicas, derivadas de los fundamentos de su razonamiento sobre la fisiología de nutrición. Estas fórmulas son (Kenworthy, 1973):

Sea X el valor de la concentración de cualquiera de los nutrientes (X en % para los macro y X en ppm para los micronutrientes),

si $X < S$ entonces:

$$P = X / S (100)$$

$$I = (100 - P) (V / 100)$$

$$B = P - I$$

si $X > S$ entonces:

$$P = X / S (100)$$

$$I = (P - 100) (V / 100)$$

$$B = P - I$$

2.1.23. Conclusiones del marco teórico

Del examen del marco teórico expuesto, se desprenden las siguientes conclusiones que sirvieron de base para la realización del presente trabajo:

1. Los sistemas expertos son aplicaciones de cómputo que están siendo desarrollados por doquier en el mundo, en una gran variedad de actividades productivas, técnicas y científicas.
2. Lo anterior, aunado a la naturaleza de estos ingenios computacionales, hace pensar en su aplicación y utilidad en las disciplinas agronómicas y en la producción agrícola.
3. Si se ha logrado detectar problemas o situaciones interesantes en la agronomía en los que factible y útil la aplicación de un sistema experto y se cuenta con las herramientas de desarrollo adecuadas, es justificado intentar la realización de un sistema para tales situaciones.
4. La concepción y la estructura de los sistemas expertos y las herramientas para su realización están en constante evolución. En pocos años, un sistema desarrollado en la actualidad, quedará obsoleto, pero el hecho de contar con personal que esté constantemente trabajando con estos ingenios, permitirá ir a la par de su evolución.

3. MÉTODOS Y MATERIALES

3.1. Proceso de elaboración del sistema experto CITRUS

3.1.1. Generalidades

CITRUS, como ha sido llamado el SE al que se hace referencia, fue desarrollado por el autor del presente trabajo con la ayuda de tres especialistas, uno que fungió como conocedor del ambiente de trabajo o "shell" o concha ARIES, con el cual fue elaborado CITRUS, otro que fungió como experto en el cultivo de los cítricos y un tercero especialista en fertilidad de suelos y nutrición vegetal.

3.1.2. Análisis del problema

Con el propósito de valorar el potencial de aplicación de los sistemas expertos en nutrición de cultivos, así como aprender la elaboración de este tipo de ingenios, se pensó eligió el tema/problema de diagnosticar el estado nutrimental de plantas agrícolas, en particular, árboles frutales cítricos. Aún cuando la sintomatología de deficiencias o excesos de nutrimentos en todos los cítricos son semejantes, se trabajó específicamente en naranja 'Valencia'.

El objetivo fue desarrollar un sistema experto que ayude a los citricultores, a técnicos y agrónomos, a que por medio de la sintomatología visual y análisis químicos de suelos y foliares, puedan diagnosticar si en los huertos de su propiedad o responsabilidad existen o no trastornos nutrimentales en cualquiera de los catorce macro y micronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio, cloro, azufre, cobre, hierro, manganeso, zinc, boro, molibdeno.

Por lo anterior, y dado que no todos los citricultores o sus técnicos han adquirido a la fecha experiencia en el manejo de computadoras y programas de cómputo, se pensó en dotar al SE de una interfase que lo hiciese fácil de operar, después de cierto entrenamiento de los potenciales usuarios por parte de los distribuidores de CITRUS.

El examen anterior convenció de la factibilidad del proyecto, toda vez que se logró identificar bien el problema a resolver, viéndose que se trataba de un problema interesante. Se verificó que las fuentes de información necesaria para el sistema y las herramientas de trabajo computacional estaban disponibles.

La revisión bibliográfica y las comunicaciones personales, indicaron al autor y a sus asesores, de que no existía en México al momento de iniciar el presente trabajo, un sistema experto dedicado al mismo problema y con las características con las que fue elaborado el sistema CITRUS.

3.1.3. Establecimiento de la base de conocimientos

Una vez analizado el problema a abordar, se procedió a reunir la información necesaria para establecer las bases de hechos y de conocimientos para el sistema. Aquí se inició la fase de la ingeniería del conocimiento, la cual tuvo que ser realizada por el propio autor.

Para establecer una base de conocimientos se tienen dos fuentes posibles: los expertos consultados en persona y la literatura sobre el tema, en este caso sobre nutrición de árboles de cítricos y específicamente sobre sintomatología visual y análisis foliares.

Para ello se recurrió a la información bibliográfica disponible, como textos sobre nutrición de cítricos y boletines de estaciones experimentales de universidades y servicios estadounidenses y cubanos, pues no fue posible obtener información de fuentes mexicanas. Además se contó con la cooperación de dos personas especialistas, una en cítricos y la otra en nutrición vegetal y suelos. A través de la información bibliográfica y de entrevistas, preparadas o espontáneas, con los expertos, se consideraron catorce nutrimentos, sus posibles deficiencias o excesos y sus repercusiones sobre la cantidad y la calidad de las cosechas; se establecieron los procesos que se siguen en la identificación de las enfermedades nutrimentales tanto desde la identificación visual de síntomas como desde la posesión de análisis químicos foliares que ayuden a la identificación. Se desechó la posibilidad de utilizar también análisis químicos de suelos, por la falta de técnicas establecidas para determinar el balance de nutrimentos en el suelo que sea óptimo para el cultivo.

La información obtenida se implementó en dos formas: 1. una base de hechos en forma de proposiciones que, según cada situación real, pueden resultar ciertas o falsas. Algunas de estas proposiciones fueron marcadas como "objetivos" a buscar si ellos se cumplen, y la mayoría como "preguntas" que el sistema hace al usuario para poder llegar a alguna conclusión sobre los objetivos, con base en las respuestas del usuario, y 2. una base de conocimientos en forma de reglas de producción¹. La herramienta de desarrollo utilizada también requirió la creación de una llamada "base de control". Cada proposición (hecho) y cada regla de producción (concatenación de hechos y sus consecuencias) introducidas a la base, representa un conocimiento sobre cítricos, de alguna persona experta.

¹ Apartados 2.1.11 y 2.1.15.2

Aunque sin formar parte de la base de conocimientos, en forma adicional, se pensó necesario crear un módulo adjunto al sistema CITRUS, elaborado con una herramienta de desarrollo distinta (VISUAL BASIC), y denominado DIAGFOL, el cual implementa la llamada "técnica de Kenworthy" para detección de deficiencias o excesos nutrimentales en base a los resultados de un análisis químico foliar y cálculo de balance de nutrimentos. En este módulo, además de la técnica señalada, se añadió más información obtenida ya sea de campo -- fotografías -- o de los propios expertos: síntomas visuales en texto. Además se agregaron en este módulo lecturas diversas sobre nutrición y fertilización de frutales cítricos, para complementar los resultados del sistema y orientar al usuario sobre las acciones a tomar en función de tales resultados.

3.1.4 Elección de la herramienta de desarrollo

La elección de la herramienta de desarrollo, como se señaló con anterioridad, es un proceso clave en el desarrollo del sistema experto. En el Apartado 2.1.17, se indicó que existen dos formas de implementar un sistema experto: 1. usar un lenguaje de programación y elaborar el sistema entero desde cero y 2. usar un ambiente de construcción de SE's el cual posee las herramientas necesarias para facilitar la elaboración del sistema, como son, por ejemplo, uno o varios motores de inferencia entre los que el ingeniero del conocimiento puede elegir (Apartado 2.1.11). Esta última forma es la que se eligió para elaborar el sistema CITRUS.

Existen en el mercado varios ambientes de desarrollo, entre ellos, ADVISOR, EXPERT EASY, EXSYS, EXPERT SYSTEM, INSIGHT, KES II, NEXPERT, OPS5+, XSYS, EXPERTOP55, GURU, ARIES. Cuando se iniciaba el proyecto del presente trabajo, se dió comienzo a un programa de colaboración en materia agronómica entre México y Cuba. Los colaboradores cubanos proporcionaron a la Universidad Autónoma Chapingo una herramienta de desarrollo de sistemas expertos de manufactura cubana denominada ARIES (ARTificial Intelligence Expert Systems).

Junto al hecho de que ARIES presenta cualidades deseables y completas para el propósito perseguido, se eligió esta herramienta para elaborar a CITRUS.

3.1.5. Desarrollo de un prototipo

Cuando se dispuso de cierta información se procedió a desarrollar un pequeño prototipo de trabajo que integraba solo a dos de los nutrimentos - nitrógeno y fósforo -- y en la base de conocimientos tan solo algunos hechos (proposiciones) y algunas reglas de producción que hacían uso de esos hechos. Este prototipo se fue ampliando con la introducción de más nutrimentos, hechos y reglas de producción, en colaboración con los expertos y los libros de consulta.

3.1.6. Validación del sistema

Se previó que una vez que el sistema CITRUS hubiera alcanzado un estado en el cual se incluyeran todos los macronutrimentos y los principales micronutrimentos, con un cierto número de proposiciones y reglas de producción para cada uno, tendría que ser sometido a un primer proceso de validación. Para ello se solicitaría al grupo de especialistas, que trabajaran con el sistema y calificaran su comportamiento.

3.1.7. Mantenimiento del sistema

CITRUS debe poseer una base de conocimientos con la información relativa a todos los macronutrientes y a los micronutrientes principales, la que podrá ser modificada (reducida o aumentada) de una manera fácil, lo que debe permitir, incluso, una actualización sencilla por parte de personas no expertas pero sí conocedoras del ambiente ARIES.

3.2. La herramienta de desarrollo ARIES

La descripción que se hace a continuación de la herramienta de desarrollo ARIES, está sustentada en los manuales del usuario de esta aplicación (Valdéz et al., 1988; COPEXTEL, 1990).

ARIES es el ambiente de trabajo diseñado por especialistas cubanos para la construcción de sistemas expertos, el cual está siendo utilizado para elaborar el sistema CITRUS. ARIES se compone de dos partes: una llamada SAMC que es la que posee las facilidades de elaboración de la base de conocimientos por parte de los ingenieros en conocimiento y especialistas en el tema, y otra llamada precisamente ARIES, la cual tiene las facilidades y la máquina de inferencias e interfaces, para la consulta del sistema por parte del usuario o consultante. La elaboración de un SEBC en cualquier ambiente exige que los ingenieros conozcan las formas de representación del conocimiento y estrategias de inferencia y control que tal ambiente admite y posee. A continuación se da una breve explicación de estos aspectos en ARIES.

Formas de representación del conocimiento en ARIES. Las primeras moléculas de conocimiento a incluir en las bases de hechos y conocimientos de un sistema experto son los conceptos simples e irreducibles que definen los hechos y aspectos básicos del problema a tratar o resolver. ARIES admite cuatro tipos de estos conceptos: Propositiones, Variables, Base de Control y Conclusiones.

Proposiciones y Variables. Estas dos son las formas más elementales e importantes sobre las cuales se elevará el edificio de conocimientos de un SEBC; en forma afirmativa o negativa dentro del sistema, ellas contienen hechos y conocimientos considerados más o menos permanentes, aunque en cualquier momento modificables, sobre la temática del ingenio; cuando se indican en forma de preguntas, ellas son presentadas al usuario o consultante como interrogantes a las que éste debe responder,

junto con un valor de incertidumbre, para indicarle al sistema el estado actual de la realidad. Proposiciones y variables difieren fundamentalmente en el tipo de valores que cada una de ellas contiene o admite. A las proposiciones se encuentra asociado solamente un valor que expresa simplemente si el contenido de la misma se cumple o no, es cierto o no; este valor es un valor de incertidumbre donde -100 indica absolutamente **NO** o **FALSO**, cero indica ignorancia y +100 indica absolutamente **SI** o **CIERTO**; el valor de incertidumbre puede ser entre -100 y +100 según sea el saber de los expertos de los cuales se toman los conocimientos o el grado de seguridad del usuario que responde a las preguntas que el sistema le hace durante una consulta. A las variables le corresponde además un valor, numérico o de otro tipo, el cual es el valor propio de la variable en un intervalo de valores posibles que la misma puede tomar. En las siguientes dos frases, que son expresiones tomadas del sistema CITRUS, la primera es una proposición y la segunda una variable numérica:

Las hojas de los árboles están amarillentas.

1. El contenido de nitrógeno en las hojas según el análisis foliar es de 2.2%.

Las proposiciones en ARIES tienen tres componentes:

1. Los textos, en los que se incluyen:
 - a) El texto base que define a la proposición como “Las hojas de los árboles están amarillentas”
 - b) Las explicaciones o aclaraciones a la proposición y
 - c) Los textos extras,
2. El valor del grado de certidumbre
3. Otros atributos.

Las variables tienen además el componente llamado parámetros, que consiste en: proposiciones asociadas, esquema de cálculo, esquema de comprobación y elementos auxiliares (otras proposiciones, programas de cómputo, pantallas de presentación, etc.).

Las proposiciones pueden ser simples o compuestas; estas últimas se obtienen mediante conectivos lógicos de negación, inclusión y conjunción de las simples. Las variables en ARIES pueden ser de los siguientes tipos:

Variables numéricas:

V. reales: de valor único, ocasionales, de intervalo, de tiempo y externas.

V. fórmula.

Variables cualitativas: simples y múltiples.

Variables de relación de comparación.

Variables de pregunta.

Variables de secuencia.

Relaciones entre conceptos en ARIES. A partir de los hechos y conocimientos expresados mediante las proposiciones y variables se pueden constituir hechos y conocimientos complejos mediante combinaciones o relaciones entre aquellas. Existen varias formas de hacer esto y ARIES contempla las siguientes: Reglas de Producción, Relaciones de Contexto, Relaciones de Evaluación, Implicaciones Declaradas, Reglas Complementarias, Reglas de Conclusiones y Base de Control. Examinamos a continuación las reglas de producción.

Reglas de Producción. Estas son quizá la forma más utilizada de representación de conocimiento compuesto en los SEBC. Una regla de producción es una estructura de la forma $A \Rightarrow S (ic, in)$, donde la parte izquierda llamada antecedente contiene las condiciones o premisas correspondientes a una situación dada, representadas por proposiciones, y la parte derecha llamada sucedente contiene la conclusión o acción a tomar, una proposición, en caso de que las premisas del antecedente se satisfagan; los valores numéricos **ic** e **in** son los grados de incertidumbre con los que piensa el experto humano que se puede cumplir o no cumplir el sucedente. Las reglas de producción no son lo mismo que las implicaciones de la lógica formal, son construcciones basadas en el conocimiento de los expertos. El conjunto de reglas de producción de un SEBC forma su base de reglas. Puesto que varias mismas proposiciones pueden intervenir en varias

reglas distintas existe entonces una estructura o árbol de reglas cuyas hojas y ramas son las proposiciones, el cual representa la forma como se integra el proceso de razonamiento que lleva a las inferencias implicadas por las reglas y la combinación de estas.

Máquina de inferencias en ARIES. En cualquier SE basado en el conocimiento existen dos componentes principales: la base de conocimientos, de la que hemos ya hablado, y los mecanismos de control que dirigen el uso del conocimiento. Estos mecanismos se constituyen de estrategias de control las que en ARIES son de dos tipos: las “clásicas” utilizadas en la mayoría de los SE's. y las características de ARIES, como es el caso de la base de control que se describió líneas arriba. Las estrategias de control clásicas o internas son, en términos de programación, programas clásicos implementados en lenguajes procedurales como Pascal o C, o un conjunto de declaraciones especiales cuando se programa en lenguajes declarativos como PROLOG o procesadores de listas como LISP. En todo caso, ellos simulan con mayor o menor éxito, procesos lógicos humanos como es la capacidad de obtener inferencias inductivas, deductivas o analógicas a partir de premisas.

Las estrategias de control clásicas implementadas en ARIES son:

1. Encadenamiento hacia adelante o proceso de inferencia dirigido por los datos u hechos, porque se parte de las evidencias primarias y se usa después el conocimiento para ver hacia que conclusión ellas apuntan; esta es la famosa técnica de Sherlock Holmes.
2. Encadenamiento hacia atrás o proceso de inferencia dirigido por hipótesis u objetivos, porque una vez fijada como factible una solución es el metaconocimiento quien indica que hechos o evidencias deben tomarse en cuenta.
3. Encadenamiento hacia adelante concentrado en un objetivo.
4. Encadenamiento combinado.

Cálculo de incertidumbres en ARIES. Todo sistema experto bien construido, debe tener las facilidades de que tanto los ingenieros de conocimiento como los potenciales usuarios del sistema puedan dotar a cada elemento de conocimiento que el sistema manejará, de un valor de incertidumbre que refleje el sentir de la persona sobre el grado de creencia o veracidad de ese elemento. Así es como pensamos y decidimos las personas en la práctica real. Ahora bien, si las conclusiones a las que llegará el sistema son producto de relaciones complejas entre elementos de conocimiento incierto, entonces las conclusiones también estarán afectadas de cierto grado de certeza o incertidumbre. Todo SEBC debe estar dotado de procedimientos de cálculo que le permitan computar la incertidumbre de las conclusiones a partir de las incertidumbres de los hechos y conocimientos que el sistema use para llegar a ellas. ARIES contempla hasta veinte formas distintas opcionales de cálculo de incertidumbres para que el ingeniero de conocimiento seleccione, aparte de un procedimiento por defecto. Algunos de esos procedimientos están basados en la propiedad arquimediana y otros no.

3.3. La herramienta de desarrollo Visual Basic

El sistema CITRUS lleva un módulo anexo el cual realiza los cálculos numéricos de la técnica de diagnóstico nutrimental de Kenworthy (Apartado 2.1.2), y a la cual se le ha dado el nombre de DIAGFOL. CITRUS realiza el diagnóstico basado en la sintomatología visual del estado nutrimental y así mismo aplica una técnica de rangos basada en los resultados de análisis foliares. Sin embargo, la técnica de Kenworthy, así como varias otras que existen, se considera mejor para ese propósito.

DIAGFOL esta basado en un lenguaje de programación distinto al del sistema experto CITRUS; DIAGFOL está elaborado con el lenguaje procedural Visual Basic. Este lenguaje, así como Visual C++, esta pensado para que el programador realice aplicaciones tipo multimedios, es decir, que además de texto pueden llevar imágenes, gráficas, sonido y video. Estos lenguajes permiten elaborar aplicaciones con interfases

programa-usuario sumamente amables con este. Visual Basic y Visual C++ son un tipo especial de lenguajes a los que se denomina: "orientados a objetos y eventos"; o sea, que además del lenguaje en sí, lo cual permite construir el programa por medio de instrucciones, poseen una gran variedad de objetos llamados genericamente "controles", los cuales simplemente se van implantado según la concepción del programador sobre su aplicación. Además a los objetos les pueden ocurrir sucesos a los cuales se les llama "eventos", los cuales ocurren cuando se realiza alguna operación como lo son presionar un botón, introducir un texto, activar una imagen, etc.; el programador aprovecha la existencia de eventos para implementar otras acciones del programa.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se presentan como un listado de una fracción de las proposiciones, reglas de producción, variables, conclusiones posibles y particiones de los que consta el sistema experto CITRUS, listado que a su vez revela la estructura del sistema, y un listado de un fragmento del programa en lenguaje Visual Basic 4.0, del módulo anexo a CITRUS, el cual implementa la técnica de Kenworthy y al que se le ha dado el nombre de DIAGFOL. Ambos listados se incluyen en el Anexo del presente trabajo.

En este capítulo se presenta una versión breve de una sesión de un usuario con el sistema CITRUS y con el módulo DIAGFOL, cada una precedida por algunas de las pantallas correspondientes. Se discute sobre la eficiencia y mejoras al sistema.

4.1. Pantallas de CITRUS

Para utilizar el sistema CITRUS es necesario hacerlo a través del programa (ambiente de trabajo) ARIES, el cual se proporciona al usuario junto con la base de conocimientos CITRUS propiamente dicha. El programa ARIES y la base CITRUS constituyen el sistema experto CITRUS. A continuación se presentan las pantallas iniciales de una sesión con CITRUS.

1. Se llama al programa CITRUS y se inicia éste presentando la pantalla con el nombre del sistema. Se presiona el botón Continuar y prosigue la carga del sistema (Figura A1 del Anexo).

2. Aparece entonces la pantalla del sistema ARIES con una serie de opciones a escoger. Lo normal es que la primera vez que se utiliza la base de conocimientos de CITRUS, se elija la opción "Cambiar la base", aparece la caja de texto "Nombre de la base". Ahí se escribirá: CITRUS (Figura A2 del Anexo).
3. Entonces, cuando se tiene una sesión con CITRUS, se llama al programa ARIES y se inicia éste presentando la serie de opciones a escoger; en este caso debe seleccionarse "Pasar a la consulta".
4. Se presenta ahora otra pantalla donde el sistema pregunta que tipos de datos posee el usuario para esa sesión; existen tres opciones "Síntomas visuales", "Análisis foliar" y "Análisis de suelo. Se debe seleccionar alguna de ellas.
5. Si el usuario selecciona "Síntomas visuales", se presenta entonces otra pantalla que le da a escoger para que nutrimento desea tener una sesión, para detectar su escasez o exceso. (Figura A3 del Anexo).

A continuación se presenta en texto un fragmento del diálogo del usuario con el sistema cuando se selecciona "Síntomas visuales" y en la siguiente pantalla se selecciona "Nitrógeno", es decir, el sistema hará preguntas que el usuario deberá contestar, para el caso de síntomas visuales para detectar ya sea escasez o exceso de nitrógeno en el huerto o lote del citricultor. Observe que el usuario puede contestar con distintos grados de certeza de SI o NO.

Los renglones con el símbolo cuadrado ■ son las preguntas o afirmaciones que hace el sistema durante la consulta. Los renglones con un guión --- son las respuestas del usuario:

Que nutrimento va a consultar ?

185 Nitrógeno 205 Boro

186 Fósforo	206 Hierro
187 Potasio	207 Manganeseo
188 Calcio	208 Zinc
204 Azufre	209 Cobre

Teclee el número correspondiente a su caso y presione INTRO y ESC para indicar su respuesta:

--- (185) INTRO ESC

Que tipo de datos posee usted ?

100 Síntomas visuales.

Análisis foliar.

Teclee el número correspondiente a su caso y presione INTRO y ESC para indicar su respuesta:

--- (100) INTRO ESC

¿Existe clorosis general del árbol ?

--- SÍ, total. INTRO

¿Clorosis uniforme sobre toda la hoja ?

--- SÍ, regular. INTRO

.....

¿ El follaje es escaso ?

--- SÍ, regular. INTRO

.....

¿ Las hojas son muy verdes ?

--- NO, regular. INTRO

CONCLUSIÓN: Según las respuestas dadas por Ud., He llegado a la conclusión de que existe una deficiencia de nitrógeno en su huerto.

¿ Quiere revisar los objetivos que se fijó ? --- INTRO

¿ Quiere continuar la consulta ? (salto)

¿ Quiere imprimir las conclusiones ? (salto)

REVISIÓN DE OBJETIVOS: En correspondencia con el caso que me plantea, se puede resumir lo siguientes para los objetivos definidos en éste examen (ordenados según sus pesos de certidumbre):

Poseemos fuertes evidencias (80 %) para asegurar que existe: [1] Deficiencia de nitrógeno.

Poseemos absoluto desconocimiento (0 %) para asegurar que: [158] el nivel de nitrógeno es satisfactorio.

Hay completo desconocimiento (0 %) para creer que existe [17] exceso de nitrógeno.

DESEA:

¿ Saber como he llegado a esta conclusión ? --- INTRO

¿ Saber la justificación de la conclusión ? (salto)

¿ Finalizar. (salto)

Entiendo que desea saber como he llegado a la conclusión de que existe: [1] Deficiencia de nitrógeno, con un grado de incertidumbre de 80 %. Esto se obtuvo a partir de las evidencias (reglas de producción) asociadas a este hecho [1], sabiendo que su contribución (de las reglas) fue positiva del siguiente modo:

Relación de reglas:

R1: + 45 %, R2: + 35 %, R3: +25 % --- ESC

DESEA:

¿ Saber como he llegado a esta conclusión ? (salto)

¿ Saber la justificación de la conclusión ? (salto)

¿ Finalizar. --- INTRO

En este diálogo, los números entre corchetes [n] son los números de las proposiciones que constituyen hechos importantes del problema, según la numeración que guardan en la base de conocimientos del sistema. No hemos incluido en el diálogo anterior, el caso de solicitar la justificación de la conclusión a la que llegó el sistema experto, porque se trata de un texto muy largo en el que expone, y en parte repite con mayor extensión, todos los detalles del proceso que se siguió desde las preguntas hasta la conclusión.

4.2. Una sesión con CITRUS sobre resultados de un análisis foliar

En la sesión del Apartado 4.1 se tuvo una consulta para determinar escasez o exceso de nutrimentos basada en los síntomas visuales observados por el citrucultor en su huerto. Pero con CITRUS es posible tener sesiones para tal propósito basado el usuario en los resultados de un análisis foliar técnico a su huerto. La sesión se inicia como en el caso anterior:

■ Que nutrimento va a consultar ?

- | | |
|---------------|----------------|
| 185 Nitrógeno | 205 Boro |
| 186 Fósforo | 206 Hierro |
| 187 Potasio | 207 Manganeseo |
| 188 Calcio | 208 Zinc |
| 204 Azufre | 209 Cobre |

Teclee el número correspondiente a su caso y presione INTRO y ESC para indicar su respuesta:

--- (185) INTRO ESC

Que tipo de datos posee usted ?

- 100 Síntomas visuales.
- 101 Análisis foliar.

Teclee el número correspondiente a su caso y presione INTRO y ESC para indicar su respuesta:

--- (102) INTRO ESC

ANALISIS DE NITRÓGENO

Seleccione el número del rango donde se encuentra el valor de su análisis:

- 103 (0.6 - 1.8 %)
- 104 (1.9 - 2.1 %)
- 105 (2.2 - 2.7 %)
- 106 (2.8 - 3.5 %)
- 107 (3.6 o más)

--- (104) INTRO ESC

■ CONCLUSIÓN: Según las respuestas dadas por usted, llegó a la conclusión de que existe un bajo nivel de nitrógeno en su huerto.

¿ Quiere revisar los objetivos que se fijó ? (salto)

¿ Quiere continuar la consulta ? INTRO

¿ Quiere imprimir las conclusiones ? (salto)

Al solicitar la continuación de la consulta se llega a una pantalla donde existe una opción para finalizar la consulta.

4.3. Examen y crítica a los Apartados 4.1 y 4.2

Los Apartados 4.2 y 4.3 ilustran el modo típico de trabajar con CITRUS. Como se observó ahí, el sistema tiene dos grandes módulos de trabajo y consulta: el módulo de consulta sobre síntomas visuales y el módulo de consulta sobre resultados de análisis foliares.

CITRUS es capaz no solo de llegar a conclusiones sobre si algún nutrimento está presente en forma escasa, normal o excesiva en un huerto de naranjo, sino, como se muestra en los Apartados indicados, puede responder a tres grandes interrogantes del usuario respecto a las conclusiones: 1.- **cómo** el sistema llegó a la conclusión que finalmente alcanzó, es decir como hizo uso de los hechos aportados y de las proposiciones y reglas de producción que forman el acervo de su base de conocimientos, 2.- como el sistema **justifica** el haber llegado a la conclusión ofrecida, dicho de otro modo, explica porque ciertos hechos y reglas contribuyen a llegar a la conclusión dada y no a otra y 3.- en cada caso expone los grados de incertidumbre que el sistema tiene sobre la conclusión y el grado de incertidumbre dado por las reglas de producción utilizadas. Esto último es importantísimo porque nos indica que el sistema no es infalible tal como no lo son ni el usuario que podría dar respuestas con cierta inseguridad, como no lo son los expertos que contribuyeron a la formación de la base de conocimientos, los cuales pueden tener ciertas inseguridades sobre como contribuyen ciertos hechos a las reglas de producción y sobre la estructura de las reglas de producción mismas. Recuérdese que tanto hechos (proposiciones) como reglas de producción representan en el sistema el conocimiento que los expertos tienen sobre el tema o problema sobre el que es especialista el sistema experto.

Las críticas u observaciones negativas que pueden hacerse al sistema CITRUS son al menos tres:

1.- En el módulo de síntomas visuales, el número de preguntas que es capaz de hacer el sistema al usuario, en lo que respecta a un nutrimento en particular, es demasiado grande, pues observaciones posteriores de otros expertos han indicado que un número menor de preguntas bien escogidas podría ser suficiente.

2.- En el módulo de análisis foliares, el sistema está sustentado en rangos de porcentajes o partes por millón de los nutrimentos, rangos que indican directamente si el nutrimento en cuestión está en estado escaso, bajo, normal, alto o excesivo con respecto a cierta norma. Este método tradicional presenta limitaciones ya que las concentraciones de los nutrientes sufren fluctuaciones dependientes de la edad de la hoja, posición relativa, clima en el momento previo al muestreo, balances de nutrientes y presencia de otros elementos beneficiosos o tóxicos (Cadahia y Lucena, 1998). Pensando en esta limitación es que se pensó en adicionar al sistema CITRUS con un módulo que hace la determinación del estado nutricional en base a un método de balance como lo es el caso de la técnica de Kenworthy, el módulo se llama DIAGFOL y de él se habla líneas abajo.

3.- El ambiente de presentación del sistema CITRUS, es decir, el ambiente ARIES, ha sido elaborado un lenguaje de programación para el sistema operativo DOS, y aún cuando hasta ahora es posible accionarlo desde el sistema operativo Windows, es posible que en algunos años quede obsoleto por no existir una plataforma desde donde operarlo. Habrá que pensar en nuevas versiones de CITRUS bajo nuevos sistemas operativos y lenguajes actuales.

CITRUS no hace recomendaciones de aplicación de fertilizantes.

Se previó que una vez que el sistema CITRUS hubiera alcanzado un estado en el cual se incluyeran todos los macronutrimentos y los principales micronutrimentos, con un cierto número de proposiciones y reglas de producción para cada uno, tendría que ser sometido a un primer proceso de validación. Para ello se solicitaría al grupo de especialistas, que trabajaran con el sistema y calificaran su comportamiento.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios en un 90%, no porque el sistema se equivocara alguna vez en sus resultados, sino porque los expertos consideraron que se habían incluido demasiados hechos y consecuentemente demasiadas reglas de producción.

4.4. Ventajas y otros elementos del sistema CITRUS-ARIES

Las sesiones típicas con CITRUS expuestas en los Apartados 4.2 y 4.3 ilustran la parte fundamental del uso de este sistema experto: la consulta escueta. Sin embargo el ambiente de trabajo ARIES bajo el cual funciona el sistema CITRUS, cuenta con toda una serie de ayudas disponibles desde un menú, que permiten tanto al usuario como al ingeniero del conocimiento el cual debe darle mantenimiento al sistema, facilitar su tarea y profundizar en los procesos que desarrolla. Estos elementos del menú de ARIES son: AYUDA, TRAZA, ORIENTACIONES, FINALIZAR, OBJETIVOS, MECANISMOS, EXPLICA, ACLARA, RECTIFICAR, COMO, POR QUE, LISTAR, VISUALIZACION, MODO DE RESPUESTAS, VISUALIZAR MENU y BRINDAR INFORMACIÓN.

En otras palabras, CITRUS-ARIES, no se limita a dar una conclusión al usuario del sistema, sino que le orienta, le aclara, le explica, le permite rectificar, le ayuda a usar el sistema.

4.5. Estadísticas de la base de conocimientos de CITRUS

Además de las proposiciones y las reglas de producción de las que ya se ha hablado profusamente en el Marco Teórico y en Métodos y Materiales, un sistema experto confeccionado en el ambiente de trabajo ARIES, posee otros elementos complementarios que también forman parte de la base de conocimientos. Estos

elementos complementarios ayudan a hacer funcional al sistema y elevar su potencial. En el Cuadro 3. siguiente se presenta la cantidad de cada uno de estos elementos que posee la base de CITRUS.

En el Anexo del presente trabajo se presenta un listado de una parte de las listas de proposiciones (hechos), variables y reglas de producción de las que consta la base de conocimientos de CITRUS.

4.6. El módulo externo de diagnóstico por análisis foliar: DIAGFOL

En el Apartado 4.2 donde se hizo un examen y crítica preliminar al sistema experto CITRUS, se indicó que el módulo interno de diagnóstico por análisis foliar presenta el inconveniente de operar por medio de la comparación de los resultados de un análisis foliar del huerto contra ciertas normas oficiales de escasés, normalidad o exceso de nutrimentos, técnica de diagnóstico que ha recibido críticas y ha sido suplantada por otras más actuales, entre ellas la técnica de Kenworthy la que se expuso extensamente en el Apartado 2.1.22.3.

El módulo diagnóstico nutrimental DIAGFOL que implementa la técnica de Kenworthy, ha sido realizado para operar bajo el ambiente Windows y elaborado con el lenguaje orientado a objetos y eventos Visual Basic. El módulo DIAGFOL recibe en una ventana (Figura 4 A del Anexo) los datos del análisis foliar del huerto o de algún lote del huerto y calcula los índices de balance de los nutrimentos dados, presentándolos en otra ventana (Figura 5 A del Anexo). Estos índices tienen la propiedad de indicar si un nutrimento se encuentra en escasés, normal o en exceso pero en balance entre los distintos nutrimentos textos explicando al usuario que síntomas debe observar para confirmar tal deficiencia. Finalmente DIAGFOL cuenta con otra ventana que a elección del usuario presenta a este lecturas relativas al fenómeno de la nutrición vegetal y en particular de los cítricos.

Cuadro 3. Estadísticas de la base de conocimientos de CITRUS

Concepto	Total
Reglas de Producción	92
Sucedentes	92
Pesos definidos	92
Reglas de Conclusiones	57
Reglas Complementarias	0
Proposiciones	212
Relaciones Contextuales	0
Relaciones de Evaluación	
Alternativas	0
Implicaciones Declaradas	0
Variables Usadas	13
Preguntas Efectivas	89
Preguntas Totales	142
Base de Control	SI
Textos para Conclusiones	55
Conclusiones	57
Particiones	11
Objetivos Definidos	53

5. LITERATURA CITADA

Baldini, E. 1992. *Arboricultura General*. Mundi-Prensa, Madrid, España, 344 p.

Barber, S. A. 1984. *Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach*. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons., New York, 398 p.

Benchimol, G.; P. Levine y J. Ch. Pomerol. 1990. *Los Sistemas Expertos en la Empresa*. Trad. *Systems Experts dans l'Éntreprise*. Macrobit Editores, México, D.F., 199 p.

Bould, C. 1961. Leaf analysis as a guide to nutritional status of soil fruit crop, pp. 28-43. *In*: W. Reuther (ed.). *Plant Analysis and Fertilizer Problems*. Amer. Inst. of Biol. Sci. Publ. No. 8, Washington, D.C.

Chapman, H. D. 1961. The status of present criteria of the diagnosis of nutrient conditions in citrus, pp. 75-105. *In*: W. Reuther (ed.). *Plant Analysis and Fertilizer Problems*. Amer. Inst. of Biol. Sci. Publ. No. 8, Washington, D.C.

Chapman, H. D. 1968. The mineral nutrition of citrus, pp. 234-246. *In*: W. Reuther, L. D. Batchelor and H. J. Webber (eds.). *Citrus Industry*. Vol. 2. *Anatomy, Physiology, Genetics and Reproduction*. University of California, Division of Agricultural Sci., Berkeley, USA.

- Cadahia L., C. y J. J. Lucena M. 1998. Diagnóstico de Nutrición y Recomendaciones de Abonado para Cultivos Bajo Fertiirrigación. Ed. Mundi-Prensa, España, 550 p.
- Corona S., T. 1998. La Inteligencia Artificial y los Sistemas Expertos Aplicados a la Agricultura y la Investigación Agrícola. Ensayo del curso Seminario III de la Maestría en Horticultura, Depto. de Fitotecnia, UACH, Chapingo, México, 29 p. Disponible en la biblioteca de la maestría.
- Fageria, N. K.; V. C. Baligar and C. A. Jones. 1991. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. Marcel Dekker Inc., New York, 274 p.
- Flores C., E. 1997. Fertilización de naranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) 'Valencia Late' basada en un análisis de suelo, en el municipio de Tihuatlán, Ver., Tesis profesional, UACH, Chapingo, 70 p.
- González A., J. L. y B. Recio. 1996. Aplicación de los Sistemas Expertos en Agricultura. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ed. Mundi-Prensa, España, 71 p.
- Haugeland, J. 1988. La Inteligencia Artificial. Trad. Irene Tulli de Firmani. Siglo XXI Editores, México, D.F., 255 p.
- Hauser, G. F. 1980. Interpretación de los análisis de suelo al formular recomendaciones sobre fertilizantes. Boletín de Suelos de la FAO No. 18, Roma, 65 p.
- Hofstadter, D. R. 1982. Gödel, Escher, Bach. Una Eterna Trenza Dorada. Trad. Mario A. Usabiaga Brandizzi. CONACYT, México, D.F., 915 p.
- Kenworthy, A. L. 1961. Interpreting the balance of nutrient elements in leaves of fruit trees, pp. 28-43. *In*: W. Reuther (ed.). Plant Analysis and Fertilizer Problems. Am Inst. of Biol. Sci., Washington, D.C.

- Kenworthy, A. L. 1973. Leaf analysis as an aid in fertilizing orchards, pp. 381-393. *In: L. M. Walsh and J. D. Beaton. (eds.) Soil Testing and Plant Analysis. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.*
- Legaz, P. F. y M. E. Primo. 1990. Normas para la fertilización de los agrios. Inst. Valenciano de Investigaciones Agrarias, Dirección General de Innovación de Tecnología, Folleto de Divulgación 5-88, 29 p.
- López, R. J. 1978. El diagnóstico de Suelos y Plantas. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España, 337 p.
- Mengel, K. and A. E. Kirkby. 1982. Principles of Plant Nutrition. International Potash Institute, P.O. Box Worblaufen-Bern, Switzerland, 593 p.
- SAGAR. 1997. Sistema Ejecutivo de Datos Básicos. SAG, Desarrollo Rural, Centro de Estadística Agropecuaria, Avances a febrero de 1997, México, D.F., p. 23.
- Smith, P. F. 1966. Citrus Nutrition, pp. 134-167. *In: Temperate and Tropical Fruit Nutrition. N. F. Childers (ed.), Rutgers University, New Jersey, USA.*
- Sánchez y Beltrán, J. P. 1990. Sistemas Expertos. Una Metodología de Programación. Macrobit Editores, México, 261 p.
- Tisdale, S. L., and W. L. Nelson. 1985. Soil Fertility and Fertilizers. Macmillan Publishing, New York, 754 p.
- Valdéz, J. J. *et al.* 1989. Ingeniería del Conocimiento en el Medio Ambiente ARIES. Lab. de Inteligencia Artificial y Análisis Exploratorio de Datos SOFTEL - ACC, Habana, 250 p.

Winston, P. H. 1994. Inteligencia Artificial. Trad. Homero Flores Samaniego. Addison-Wesley Iberoamericana, 805 p.

Wutscher, H. K. and P. F. Smith. 1993. Citrus, 202-300 pp. *In*: Nutrition Deficiencies and Toxicities in Crop Plants. W. F. Bennett (ed.), APS Press, St. Paul, Minnesota, USA.

6. ANEXOS

ANEXO 1: PANTALLAS DEL SISTEMA CITRUS Y DEL MÓDULO DIAGFOL

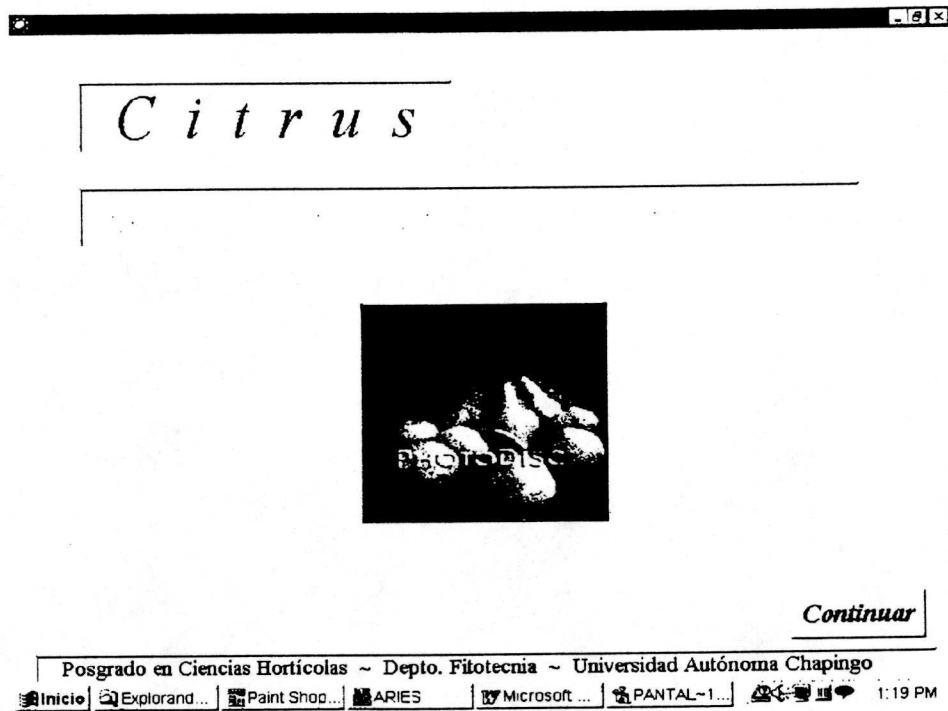


Figura 1 A. Pantalla inicial del sistema CITRUS

ARIES U4.01 7/90

ARIES

```
Base: citru
P(asar a la consulta
C(ambiar los parámetros
U(isualizar parámetros
E(xtraer información externa
cA(mbiar la base
O(rientaciones
ESC      ↑  ↓
```

Copyright (C) COPEXTEL 1991
All rights reserved
No. Serie: 914010102

Figura 2 A. Pantalla del ambiente de presentación ARIES

OPCIONES		HHIES V4.01 //YU	
Base de Conocimientos: CITRU		Help base Traza [NO]	
Orientaciones	aYuda para responder	Finalizar	objetivos Mecanismos
Explica[cod]	Aclarar Rectificar	CómoP[cod]	Por qué Listar
Visualización	moDo respuestas	vIsualizar menú	Brindar Inf.Voluntaria

Variable 1

Qué posee usted:

100.- Síntomas visuales.

101.- Análisis foliar.

102.- Análisis de suelo.

Posibilidades del Sistema

Help (Ayuda en Linea).

Aclaraciones sobre:

100, 101 y 102

Según los síntomas o análisis que posea
seleccione una o varias opciones >? █

Pulse los números correspondientes a su caso y ESC para indicar que finalizó

Figura 3 A. Pantalla para seleccionar el tipo de datos para la consulta.

Datos del Análisis Foliar

Resultados Sintomas Lecturas Terminar

Introduzca los datos del Análisis Foliar

Nombre del huerto o lote:

LA ESPERANZA

Fecha del muestreo:

17-MARZO-99

Macro Nutrientes:

% Nitrógeno:

2.3

% Magnesio:

0.30

% Fósforo:

0.18

% Sodio:

-1

% Potasio:

1.1

% Cloro

-1

% Calcio:

4.65

% Azufre

-1

Micro Nutrientes:

ppm Cobre:

10.0

ppm Zinc:

60.1

ppm Hierro:

100.0

ppm Boro:

-1

ppm Manganese:

68.1

ppm Molibdeno

-1

Proceder >

Nueva Consulta

Figura 4 A. Pantalla para introducción de datos en DIAGFOL.

Resultados

Datos
Sintomas
Lecturas
Imprimir
Terminar

Resultados

Laboratorio Nutricion Vegetal

Huerto o Lote:

LA ESPERANZA

Fecha muestreo:

17-MARZO-99

Nutriemento	Análisis Foliar	Balance	Estado	Color
FOSFORO	0.18	111.22	NUTRIMENTO NORMAL	
CALCIO	4.65	102.31	NUTRIMENTO NORMAL	
MANGANESO	68.1	101.66	NUTRIMENTO NORMAL	
COBRE	10	99.98	NUTRIMENTO NORMAL	
HIERRO	100	97.7	NUTRIMENTO NORMAL	
ZINC	60.1	97.29	NUTRIMENTO NORMAL	
NITROGENO	2.3	94.43	NUTRIMENTO NORMAL	
POTASIO	1.1	86.94	NUTRIMENTO NORMAL	
MAGNESIO	0.3	76.87	NUTRIMENTO ABAJO DE LO NORMAL	
SODIO	-1		NUTRIMENTO NO DETERMINADO	
CLORO	-1		NUTRIMENTO NO DETERMINADO	
AZUFRE	-1		NUTRIMENTO NO DETERMINADO	
BORO	-1		NUTRIMENTO NO DETERMINADO	
MOLIBDENO	-1		NUTRIMENTO NO DETERMINADO	

DIAGFOL - Datos de Fisiología - Universidad Autónoma Chapingo

Figura 5 A. Pantalla de Resultados de DIAGFOL.

ANEXO 2: PARTE DE LOS LISTADOS DE PROPOSICIONES, VARIABLES Y
REGLAS DE PRODUCCIÓN, DE LA BASE DE CONOCIMIENTOS DEL
SISTEMA EXPERTO CITRUS

Proposiciones para deficiencia de nitrógeno:

-Deficiencia de nitrógeno
No deficiencia de nitrógeno
-Clorosis general del árbol
No se observa clorosis general del árbol
-Clorosis uniforme sobre toda la hoja
No hay clorosis uniforme sobre toda la hoja
-Desprendimiento fácil de frutos y hojas
No hay desprendimiento fácil de frutos y hojas
-La perdida del color verde normal aparece en toda la
planta
La perdida del color verde no normal aparece en toda la
planta
-Achaparramiento del árbol
No hay achaparramiento del árbol
-La perdida del color es mayor en las ramas con frutas
La perdida del color no es mayor en las ramas con frutas
-El follaje es escaso
El follaje no es escaso
-Existen ramas muertas
No existen ramas muertas
-Hay pocos frutos
No hay pocos frutos
-Los frutos son pequeños
Los frutos no son pequeños
-Los frutos tienen la corteza lisa y fina
Los frutos no tienen la corteza lisa y fina
-La floración es escasa
La floración no es escasa
-El contenido de jugo es bajo
El contenido de jugo no es bajo
-Las hojas pequeñas
Las hojas no pequeñas
-Se observa un ángulo estrecho entre ramas y hojas nuevas
No se observa un ángulo estrecho entre ramas y hojas
nuevas
.....

Variables 1 y 2 de la base:

Variable 1:

Qué datos posee usted:

100.- Síntomas visuales.
101.- Análisis foliar.
102.- Análisis de suelo.

Según los síntomas o análisis que posea,
seleccione una o varias opciones.

M 3 100 101 102
-100.0 1 0 0

>SELECCIONA EL TIPO DE INFORMACIÓN DE DIAGNOSTICO
>ESTA VARIABLE SIRVE PARA SELECCIONAR EL
TIPO DE INFORMACION QUE EL USUARIO
POSEE PARA EL DIAGNOSTICO.\

Variable 2:

ANÁLISIS DE NITRÓGENO

Seleccione el número del rango donde
se encuentre el valor de su análisis.

[103] (0.6 - 1.8)
[104] (1.9 - 2.1)
[105] (2.2 - 2.7)
[106] (2.8 - 3.5)
[107] (3.6 c m s)

C 5 103 104 105 106 107
-100.0 1 0 0

>ANALISIS FOLIAR DEL NITROGENO
>EN ESTA VARIABLE SE DEBE SELECCIONAR EL RANGO DONDE SE ENCUENTRE EL
VALOR DEL NITROGENO EN PORCIENTO DE MATERIA SECA, DEL ANALISIS FOLIAR
HECHO A SU HUERTO.\

.....

Inicio de la base de reglas:

92 0 100.0 0

100 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16
=> 1 (90.0 0.0);
100 & 2 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 => 1
(70.0 0.0);
100 & 5 & 6 & 8 & 11 & 13 & 15 => 1 (50.0 0.0);

```
100 & 18 & 19 & 20 & 21 & 22 => 17 (90.0 0.0);
100 & 18 & 19 & 22 => 17 (70.0 0.0);
100 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 30 & 31 & 32 & 33 & 34 & 35 => 23
(90.0 0.0);
100 & 24 & 26 & 29 & 32 & 33 & 35 => 23 (70.0 0.0);
100 & 37 & 38 & 39 & 40 & 41 & 42 & 43 & 44 & 45 => 36 (90.0 0.0);
100 & 38 & 39 & 41 & 44 & 45 => 36 (70.0 0.0);
100 & 47 & 48 & 49 & 50 => 46 (90.0 0.0);
100 & 47 & 49 & 50 => 46 (70.0 0.0);
.....
```

ANEXO 3: FRAGMENTO DEL PROGRAMA DEL MÓDULO DIAGFOL EN LENGUAJE VISUAL BASIC

'Calculos Kenworthy

Public Sub CalculaKenworthy()
'Cálculo de Indices de Balance B

Dim K As Byte

For K = 1 To TotalNutrims

 If Norma(K) >= 0 And X(K) >= 0 Then

 If X(K) < Norma(K) Then

$P(K) = X(K) / \text{Norma}(K) * 100$; $I(K) = (100 - P(K)) * V(K) / 100$

$B(K) = P(K) + I(K)$

 End If

 If X(K) >= Norma(K) Then

$P(K) = X(K) / \text{Norma}(K) * 100$; $I(K) = (P(K) - 100) * V(K) / 100$

$B(K) = P(K) - I(K)$

 End If

 End If

 If Norma(K) < 0 Or X(K) < 0 Then

$B(K) = -1$

 End If

Next K

'Estados y Colores nutrimentales

For K = 1 To TotalNutrims

 If B(K) < 0 Then

 Edo(K) = "NUTRIMENTO NO DETERMINADO"

 End If

 If B(K) >= 0 And B(K) <= 50 Then

 Edo(K) = "NUTRIMENTO EN DEFICIENCIA"

 End If

 If B(K) >= 51 And B(K) <= 83 Then

 Edo(K) = "NUTRIMENTO ABAJO DE LO NORMAL"

 End If

 If B(K) >= 84 And B(K) <= 117 Then

 Edo(K) = "NUTRIMENTO NORMAL"

 End If

 If B(K) >= 118 And B(K) <= 150 Then

 Edo(K) = "NUTRIMENTO ARRIBA DE LO NORMAL"

 End If

```
If B(K) >= 151 Then  
Edo(K) = "NUTRIMENTO EN EXCESO"  
End If  
Next K
```