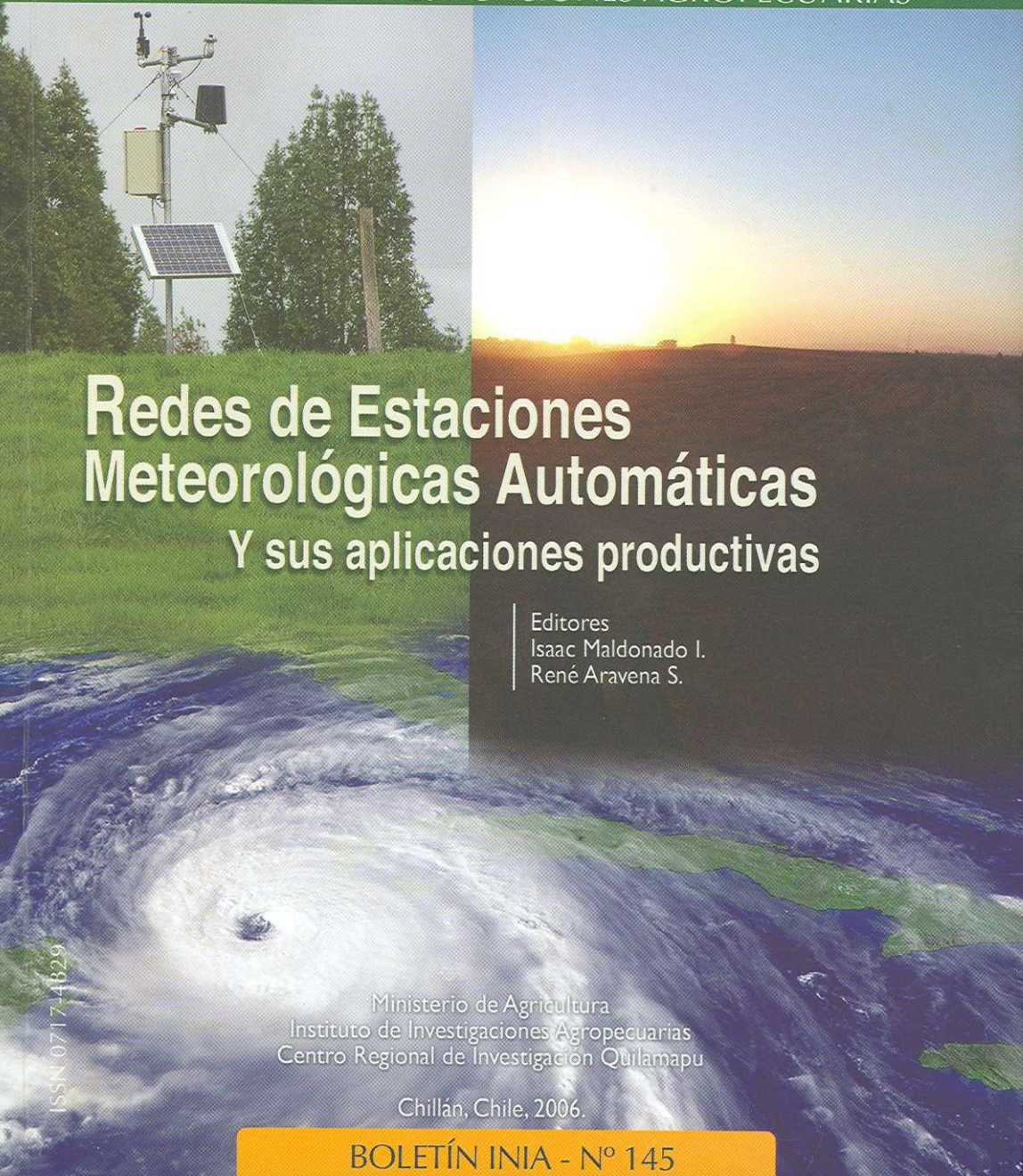




GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE AGRICULTURA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS  
INIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS



# Redes de Estaciones Meteorológicas Automáticas Y sus aplicaciones productivas

Editores  
Isaac Maldonado I.  
René Aravena S.

Ministerio de Agricultura  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias  
Centro Regional de Investigación Quilamapu

Chillán, Chile, 2006.

BOLETÍN INIA - N° 145

ISSN 0717-4629

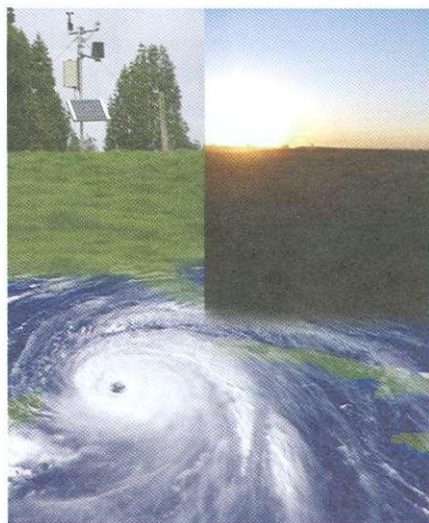


GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE AGRICULTURA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS  
INIA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

# REDES DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS

Y sus aplicaciones productivas



Centro Regional de Investigación Quilamapu  
Chillán, Chile, 2006.

Editores Técnicos  
Isaac Maldonado I.  
René Aravena S.

Director Regional INIA  
Claudio Pérez C.

Editor General  
Hugo Rodríguez A.

Boletín INIA Nº 145.

Este boletín fue editado por el Centro Regional de Investigación  
Quilmapu, Instituto de Investigaciones Agropecuarias,  
Ministerio de Agricultura.

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente  
y los editores.

Cita bibliográfica correcta:  
Maldonado I., Isaac; Aravena S. René. 2006. Redes de Estaciones  
Meteorológicas Automáticas y sus aplicaciones productivas.  
Chillán, Chile.  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias.  
Boletín INIA Nº 145, 380 p.

Diseño y diagramación  
Ricardo González Toro

Impresión  
Trama Impresores S.A.

Cantidad de ejemplares 100.

Chillán, 2006.

Nota: La mención de marcas y modelos en el presente boletín no constituye, necesariamente, una recomendación del Instituto de Investigación Agropecuarias, INIA.

## Consultores Técnicos

Ivette Acuña, Ingeniero Agrónomo, Phd  
INIA Remehue

Wilson Esquivel, Ingeniero Mecánico, Dr.,  
Universidad de Concepción

David González, Ingeniero Forestal, Ph.D.,  
Universidad de Concepción

Jorge Jara, Ingeniero Agrónomo, Ph.D.  
Universidad de Concepción

Ricardo Madariaga, Ingeniero Agrónomo, Ph.D.,  
INIA Quilamapu

Isaac Maldonado, Ingeniero Agrónomo, M.Sc.,  
INIA Quilamapu

Samuel Ortega, Ingeniero Agrónomo, Ph.D.,  
Universidad de Talca

Patricio Pedernera, Ingeniero Forestal,  
Universidad Mayor

Eduardo Peña, Ingeniero Forestal, M.Sc.,  
Universidad de Concepción

Celerino Quezada, Ingeniero Agrónomo, M.Sc.,  
Universidad de Concepción

Alejandro Venegas, Ingeniero Agrónomo, M.Sc.,  
Universidad de Concepción



# ÍNDICE

|                                                                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Prólogo</b>                                                                                                                             | <b>7</b>   |
| <b>REDES</b>                                                                                                                               | <b>9</b>   |
| <b>Capítulo 1.</b> Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas como base para crear Sistema de Alerta temprana en la VIII Región.         | <b>11</b>  |
| <b>Capítulo 2.</b> Redes agrometeorológicas y sistemas de alerta temprana en Estados Unidos.                                               | <b>37</b>  |
| <b>ESTACIONES METEREOLÓGICAS AUTOMÁTICAS</b>                                                                                               | <b>59</b>  |
| <b>Capítulo 3.</b> Descripción de sensores y componentes asociados a una Estación Meteorológica Automática.                                | <b>61</b>  |
| <b>Capítulo 4.</b> Sistemas de control de calidad y procesamiento de datos.                                                                | <b>83</b>  |
| <b>APLICACIONES</b>                                                                                                                        | <b>99</b>  |
| <b>Capítulo 5.</b> Sistemas de pronóstico de enfermedades.                                                                                 | <b>101</b> |
| <b>Capítulo 6.</b> Alerta temprana de la sarna del manzano ( <i>Venturia inaequalis</i> ) en la zona de Los Ángeles, VIII Región de Chile. | <b>137</b> |
| <b>Capítulo 7.</b> Sistema de alerta temprana del tizón tardío ( <i>Phytophthora infestans</i> ) de la papa.                               | <b>173</b> |
| <b>Capítulo 8.</b> Sistema de alerta temprana en remolacha ( <i>Beta vulgaris</i> ) en Estados Unidos.                                     | <b>193</b> |
| <b>Capítulo 9.</b> Sistema de programación de riego usando Estaciones Meteorológicas Automáticas.                                          | <b>217</b> |

|                                                                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 10.</b> Programación de riego en remolacha ( <i>Beta vulgaris L.</i> ) utilizando el modelo de Penman-Monteith y el evaporímetro de bandeja. | <b>235</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>NUEVOS DESAFÍOS</b> | <b>263</b> |
|------------------------|------------|

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 11.</b> Sistema de monitoreo de planta. | <b>265</b> |
|-----------------------------------------------------|------------|

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| <b>APLICACIÓN FORESTAL</b> | <b>289</b> |
|----------------------------|------------|

|                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 12.</b> Sistema de evaluación de peligro de incendios forestales, una experiencia argentina. | <b>291</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 13.</b> Evaluación del riesgo de incendios forestales. | <b>311</b> |
|--------------------------------------------------------------------|------------|

|                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 14.</b> Referencias para el desarrollo de un sistema nacional de pronóstico de incendios forestales. | <b>327</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 15.</b> Desarrollo de un sistema de alerta temprana de incendios forestales para Chile. | <b>343</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

|                                                                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 16.</b> Gestión para la protección contra incendios forestales en la VIII Región del Bío Bío. | <b>365</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

# PRÓLOGO

Desde el inicio el hombre ha debido crear estrategias para adaptarse a las condiciones climáticas. Sin embargo, el desarrollo económico y la urgente necesidad de optimizar recursos productivos, entre los que se incluye el clima, le ha obligado a estudiar y entender mejor su comportamiento por medio de la observación sistemática y permanente de las variables que lo integran, y gracias a la implementación y uso de estaciones meteorológicas manuales y automáticas.

En la actualidad, cuando el sector silvoagropecuario vive un proceso de modernización e inserción a una economía abierta y competitiva, se requiere de nuevas estrategias que permitan reducir al máximo aquellas incertidumbres que arriesguen sus resultados productivos. Sin duda, el monitoreo y la generación de modelos aplicados, que interpreten y permitan el desarrollo de sistemas de alerta climática, responde a una necesidad específica del productor, especialmente cuando su objetivo no sólo es producir, sino ajustarse a exigencias cada vez mayores de calidad y oportunidad, como única vía para que la comercialización de sus productos le asegure el máximo retorno económico.

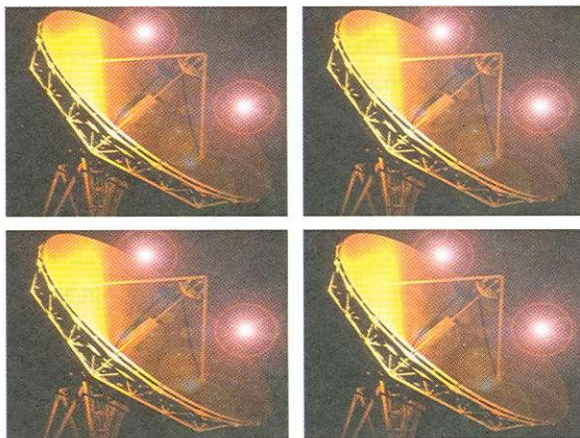
El desarrollo científico y tecnológico alcanzado a la fecha, permite disponer y utilizar herramientas como las estaciones meteorológicas automáticas (EMA's), que junto al gran avance de los sistemas de comunicación y los del mundo de la computación y el procesamiento de datos, hace posible contar con sistemas de monitoreo climático en tiempo real, lo que representa un avance trascendente. Esto, porque la información climática con que se trabaja es la del momento, lo que permite generar información que apoye la toma de decisiones de quienes tienen la responsabilidad de producir. En tal sentido, se dispone de modelos de alerta temprana de enfermedades, sistemas de programación de riego y alerta de incendios forestales.

Finalmente, es importante señalar que mediante este texto se ha buscado reunir en una publicación una serie de líneas de trabajos que apuntan en la dirección de lo que ya se ha señalado como necesario: el uso que hoy día tiene la meteorología.

Isaac Maldonado I.



# Redes



# CAPÍTULO 1

## **RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS COMO BASE PARA CREAR SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA EN LA VIII REGIÓN**

*Autor*

**Isaac Maldonado I.**

Ing. Agr. MSc. Instituto de  
Investigaciones Agropecuarias,  
INIA Quilamapu, Chillán, Chile.  
imaldona@inia.cl

La conformación de la red de estaciones meteorológicas automáticas en tiempo real para la VIII Región del Bío Bío se produce al detectar la existencia de un importante número de estaciones meteorológicas de propiedad de diferentes instituciones y empresas que eran operadas, en forma directa, mediante la visita semanal quincenal o mensual al lugar en que éstas se encontraban instaladas, con la finalidad de extraer los datos mediante un computador portátil. Esta modalidad implicaba que los datos se recibían desfasados no pudiendo ser utilizados en trabajos de monitoreo de situaciones productivas. Se puede afirmar que al no disponer de una comunicación directa con la estación meteorológica, no era factible su empleo como una herramienta de apoyo a la gestión productiva ya sea agrícola o forestal.

Ante la posibilidad de poder comunicar las estaciones y, más aún, de establecer una red que permitiría complementar información con las estaciones vecinas, se genera una sinergia que permite agregar valor a la inversión que cada uno de los integrantes ya había hecho con la adquisición de los equipos.

Un segundo aporte de la red consiste en la posibilidad de establecer una operación centralizada de los equipos, como base para monitorear el funcionamiento de éstos, asegurando la calidad de los datos que cada una de las estaciones de la red pudiese entregar. Para ello se hacía importante desarrollar un software de administración central de la red que se encargara de coleccionar los datos y poblar la base de datos de la red.

Un elemento central para la conformación de esta red consistía en adquirir y adaptar equipos de comunicación para cada una de las estaciones que, además, debían disponer de un software con la opción de establecer una comunicación en forma remota. Además, se vio la necesidad de desarrollar y/o validar modelos de alerta temprana que mostraran aplicaciones concretas en el quehacer productivo del sector silvoagropecuario. Para ello se definió desarrollar modelos de alerta de enfermedades, alerta de incendios forestales y la validación de un modelo de programación de riego.

## **1.1. INFORMACIÓN GENERAL**

Para los fines de este boletín, el tema central será identificar y describir los componentes y aplicaciones que tienen las redes de estaciones meteorológicas automáticas conectadas en tiempo real, como herramientas que apoyan la actividad productiva del mundo agrícola y forestal.

La conformación de una red incluye manejar los siguientes conceptos:

### **1.1.1. Red de estaciones meteorológicas automáticas**

Equivale a un conjunto de estaciones meteorológicas localizadas en diferentes puntos geográficos y accionadas en forma remota desde un servidor central, mediante un sistema de comunicación que conecta el computador con el captador de datos (datalogger) que tiene la estación.

### **1.1.2. Estación meteorológica**

Área en la que se ubica uno o más instrumentos que miden y registran datos meteorológicos (Foto 1.1).

### **1.1.3. Estación Meteorológica Automática (EMA)**

Estación meteorológica que mediante el uso de un equipo computarizado (datalogger) y sus correspondientes sensores electrónicos, registra en forma sistemática y programada la toma de datos meteorológicos de acuerdo al interés de su propietario y a la capacidad del equipo.



Foto 1.1. Diferentes condiciones de instalación de una EMA.

#### 1.1.4. Componentes de una EMA

- a) **Datalogger** (Foto 1.2). Incluye la unidad responsable de consultar y registrar, en forma programada y sistemática, la información proporcionada por cada uno de los sensores de que dispone la EMA.



Foto 1.2. Dataloggers de diferentes marcas. Davis, Monitor II (1), Davis, VantagePro (2), Jauntering, HL 10 (3), Licor, LI-1400 (4), Luft, OPUS II (5), Delta-T, DL 2 (6) y Campbell, CR 1000 (7).

- b) **Sensores.** Son dispositivos que, de acuerdo a su construcción y a los componentes electrónicos utilizados, son capaces de transformar una determinada variable climática en un impulso eléctrico que puede ser registrado interpretado y mostrado como un valor para cada una de las variables que se desea monitorear. Las variables que más comúnmente se incluyen en una estación son: temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación, presión barométrica, velocidad y dirección del viento.

- c) **Sistema de alimentación de energía.** Es el componente que permite proveer la energía requerida para el funcionamiento de sensores, la captura de los datos desde cada uno de los sensores, su procesamiento, el registro, almacenamiento y la transmisión de éstos a un computador o servidor utilizado para estos fines.

Los tipos más comunes de alimentación utilizados en meteorología están basados en el uso de:

- **Energía eléctrica alterna proveniente de la red de 220 Volt.** Dado que los datalogger normalmente están diseñados para una alimentación que fluctúa entre los 6 y los 12 Volt, se requiere del uso de un transformador que ajuste la alimentación a las exigencias del equipo. Es común agregar una batería de igual voltaje a la que exige el datalogger, para asegurar el funcionamiento cuando hay cortes de energía eléctrica, hecho bastante frecuente en los sectores rurales y apartados.
  - **Energía eléctrica continua proveniente de una batería.** Éstas incluyen pilas de diversos tamaños, baterías de estado sólido recargables y del voltaje que exige el equipo.
  - **Paneles solares.** Permiten que se recarguen las baterías, especialmente cuando la estación está en lugares apartados, garantizando la autonomía de funcionamiento. Es fundamental que la elección del panel solar se ajuste al voltaje de funcionamiento de la estación y de los equipos anexos que sea necesario utilizar. Sin embargo, es importante definir el consumo total de la unidad, de manera que exista un balance positivo en la generación de energía por parte del panel durante los 365 días del año. Esto significa que es importante analizar la eficiencia del panel en los meses invernales, cuando existe una gran cantidad de días nublados, más aún cuando hay presencia de neblinas densas.
- d) **Sistemas de comunicación y transmisión de datos.** Es el medio que permite extraer los datos desde el Datalogger a un computador en el que se radica la base de datos de la red. Al respecto, la tecnología actual

ofrece, como medio para establecer la comunicación entre el computador y el datalogger, las siguientes opciones que se utilizan dependiendo de las condiciones que se tienen en el área en la que se desea opere la red que se desea crear.

- **Comunicación directa computador-datalogger:** mediante un cable con conexión RS232 ó RJ-485.
- **Comunicación vía red telefónica fija:** para comunicar el computador con el datalogger en forma remota por medio de una línea telefónica. Es necesario disponer de un módem junto al computador (interno o externo) que se comunique con el módem externo que se instala junto al datalogger de la EMA.
- **Comunicación vía telefonía móvil.** Al igual que en la telefonía fija, es necesario disponer de un módem externo junto al computador y otro en la EMA desde la que se desean bajar los datos.
- **Comunicación vía Telemetría u ondas de radio.** En este caso se requiere disponer de equipos que permitan cubrir la distancia entre la EMA y el punto donde se ubica el computador. Dependiendo de la distancia y de las condiciones topográficas del lugar, es necesario utilizar antenas repetidoras.

Para operar este sistema es necesario obtener una frecuencia de transmisión que se solicita al Ministerio de Obras Públicas a la Dirección de Telecomunicaciones.

- **Comunicación vía tecnología satélite.** Requiere disponer de un contrato con un satélite que dé acceso a trasladar la señal por esa vía además de adquirir el equipo de comunicación entre la EMA, el satélite y el computador que recepciona la señal.



### 1.1.5. Tipos de EMA's

De acuerdo a la flexibilidad para definir su configuración y entendiéndose por ello, el número y tipo de sensores a utilizar, como a su vez las opciones de cómo registrar el dato en lo que respecta a su frecuencia de escaneo, frecuencia de almacenamiento y al procesamiento de los datos, se pueden asignar a dos grandes grupos:

- a) **EMA's de Configuración Cerrada (Foto 1.3).** Se incluirán en este grupo a aquellas estaciones que disponen de un determinado tipo y número de sensores definidos por el fabricante de la EMA.

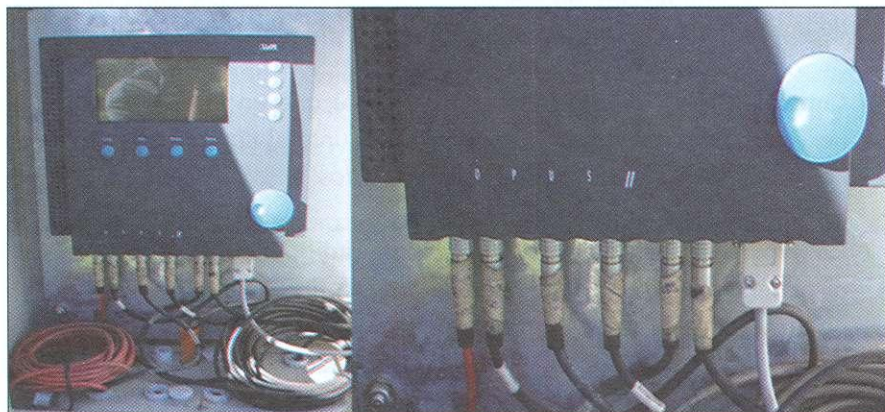


Foto 1.3. Vista general de datalogger Marca Luft, modelo OPUS II y detalle de conexiones a sensores (número predeterminado).

- b) **EMA's de configuración abierta (Foto 1.4).** Considera a aquellas estaciones que permiten incluir sensores de acuerdo a lo que desee registrar. Si se dispone de las competencias es posible que el usuario final pueda agregar sensores contruidos por el mismo de acuerdo a las especificaciones del datalogger.



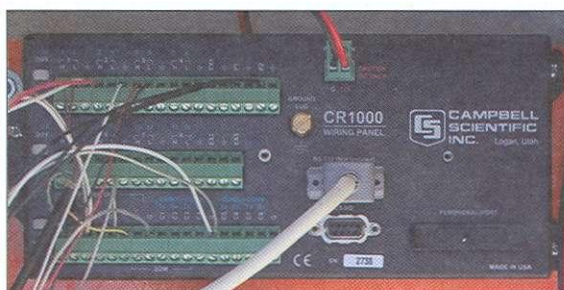


Foto 1.4. Detalle de conexiones de sensores a datalogger marca Campbell, modelo CR 1000.

## 1.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA RED

### 1.2.1. Desarrollo de un software de administración central de la red

Para desarrollar el software se tuvo en consideración:

- a) **Estaciones meteorológicas de diferentes marcas, modelos y configuraciones.** Esto significa que el software a desarrollar debía ser capaz de interactuar con cada uno del software propietario que traía cada una de las estaciones meteorológicas de la red.
- b) **Comunicación mediante telefonía móvil, fija o rural.** Esta condición establecía que para realizar la comunicación se hacía necesario disponer de un módem para cada marca y modelo de EMA, con el correspondiente ajuste del software interno del módem para que se establezca la comunicación entre el módem y el datalogger, debiendo además construir el cable de comunicación entre el datalogger y el módem.

### 1.2.2. Sistema de comunicación

Para definir la tecnología de comunicación a utilizar es importante conocer la frecuencia y la duración de la comunicación que se requiere

establecer. Por lo tanto, se ha dejado como rutina de bajada de datos el que cada propietario debe costear una bajada diaria de datos de cada una de las estaciones de la red que le pertenecen (de preferencia durante la noche), sin desmedro de que si alguno de los demás integrantes de la red desea obtener datos con una frecuencia mayor puede hacerlo, pero debiendo costear los minutos de comunicación que se utilicen para satisfacer este requerimiento.

Al evaluar las diferentes opciones de comunicación se analizaron las siguientes opciones:

- a) **Telemetría.** El uso de la comunicación de telemetría o radio se vio que tenía un costo alto en la inversión inicial y muy bajo en la operación. Sin embargo, dada la extensa área que se debía cubrir, se hacía imposible de abordar ya que esto requería de un gran numero de repetidoras para poder cubrir la región desde el lugar donde se encontraban ubicadas la estaciones, por lo que fue descartada como opción a implementar al interior de la red.
- b) **Telefonía fija.** Sin duda es una muy buena opción. Se decidió su uso en aquellas estaciones en que se disponía de este servicio; sin embargo, la gran mayoría de las estaciones meteorológicas se encuentra ubicada en sectores rurales alejados de la ciudad y no disponen de este servicio.
- c) **Telefonía rural.** Se utiliza en las estaciones donde este servicio se encuentre disponible, pero tiene un costo mayor a la telefonía móvil.
- d) **Telefonía móvil.** Es la opción que mejor se adapta al sistema que se desea implementar, debido a los costos de la inversión inicial y al costo operativo mensual.

### 1.2.3. Diseño del software del servidor de la red

El desarrollo de este tipo de sistemas debe asegurar un funcionamiento seguro y robusto, buscando que el proceso de colecta, almacenamiento y presentación de los datos se haga con una mínima intervención humana

la que sólo debería ejercer chequeos rutinarios para controlar la correcta operación del sistema.

En resumen, es necesario diseñar e implementar un sistema de captura automática de datos desde las EMA's, además de diseñar e implementar diferentes servicios automatizados de información meteorológica para ser presentados a través de páginas Web y enviado a los usuarios del sistema por medio del correo electrónico.

Lo antes mencionado significa que es necesario:

- a) Diseñar módulo de comunicación que permita comunicarse con cada una de las EMA's de la red y coleccionar los datos en forma remota a la base de datos del sistema.
- b) Establecer esquemas de respaldo de la información.
- c) Definir, configurar e implementar el servidor Web con el software necesario para entregar los servicios requeridos.
- d) Definir e implementar las consultas necesarias para otorgar los servicios requeridos.
- e) Implementar los medios de control de acceso a los datos.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema que representa el sistema que administra el funcionamiento automatizado de la red.

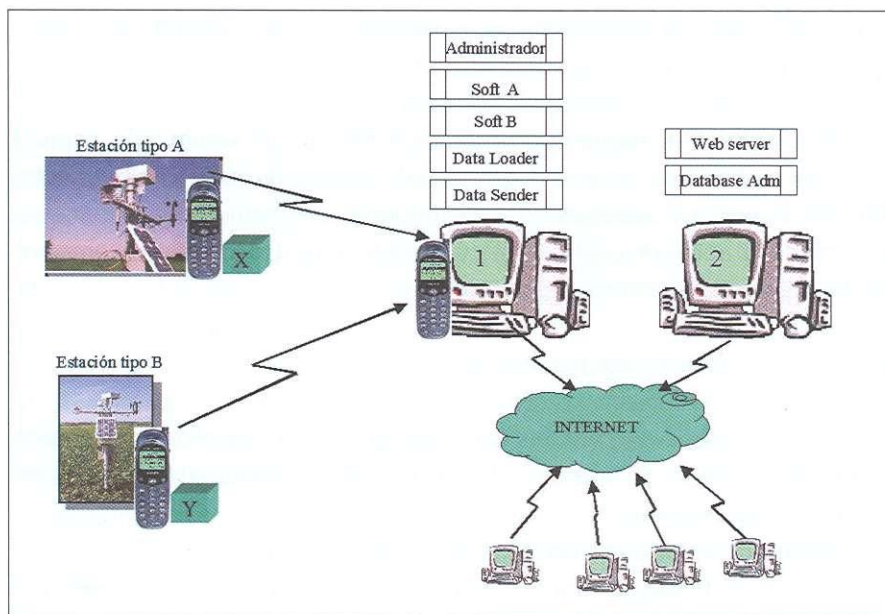


Figura 1.1. Esquema general del sistema de administración automatizada de la red.

#### 1.2.4. Los equipos de la red

Las EMA's que integran la red tienen la posibilidad de comunicarse en forma remota vía el puerto serial RS-232, al que se conecta un módem, y cuya función es detectar el "ring" del teléfono y transferir la llamada a la estación. Así se logra la comunicación entre el datalogger y el computador por medio del software propietario de cada una de las EMA's.

El módulo de carga (Figura 1.1, Data loader) de datos se activa a horarios determinados y revisa cada una de las carpetas de carga de datos en busca de datos nuevos y ejecutar así los procesos correspondientes para incorporarlos a la base de datos general. La programación de activación de este módulo se hace a través de la utilidad de programación de tareas de Windows.

El módulo de envío de datos (Figura 1.1, Data sender) también se activará a horarios determinados según lo establecido en la programación de tareas de windows y revisa una tabla de procesos que ejecuta en secuencia para

enviar los resultados vía correo electrónico a los usuarios suscritos a los distintos servicios. Dada la diversidad de la información posible de extraer, este módulo tiene la capacidad de enviar un archivo definido a una hora determinada a una dirección de correo electrónico específica.

De este modo, el Servidor 1 corre, principalmente, con procesos programados como son los softwares propietarios de las EMA's y los módulos de carga de datos (Data loader) y de envío de datos (Data sender).

Este programa está instalado en la base de datos BDMET, la que recibe y envía información bajo el control del software "ADMINISTRADOR DE PROCESOS".

El Software trabaja en Microsoft Windows 98 ó posterior. Fue construido en el lenguaje de programación Visual Fox y la base de datos en el Motor de base de datos Fox Pro.

Como requisito de hardware de comunicación la configuración posee un sistema remoto automatizado y programable de recolección de datos desde las EMA's.

### **1.2.5. El Software**

El diseño del software de administración del sistema incluye un importante número de pantallas de ingreso de información para configurar el sistema, el diseño de las tablas, la descripción de los procesos, la carga de los datos a la base de datos junto a la opción de ingresar nuevas EMA's a la red. Finalmente se dispone de opciones que describen las variables climáticas asociadas a cada estación con sus unidades de medida y el ingreso de los usuarios.

En la Figura 1.2. se muestra la ventanilla inicial que ofrece las siguientes opciones de configuración, tablas, procesos, carga de datos, programa, definición de las variables a medir en cada estación, sus unidades de medidas y los usuarios del sistema.

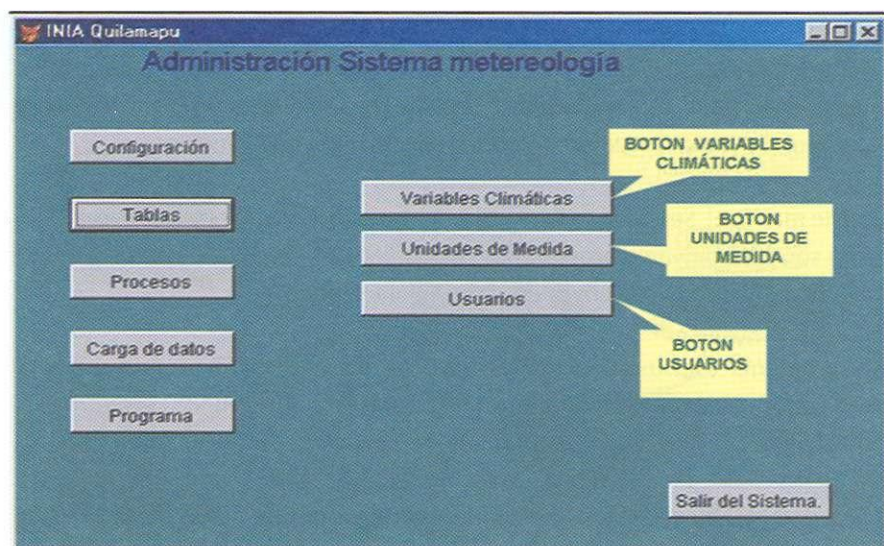


Figura 1.2. Ventana que muestra las opciones para la administración general del sistema.

En la Figura 1.3 se presenta la ventanilla que permite identificar cada una de las estaciones que conforman la red.

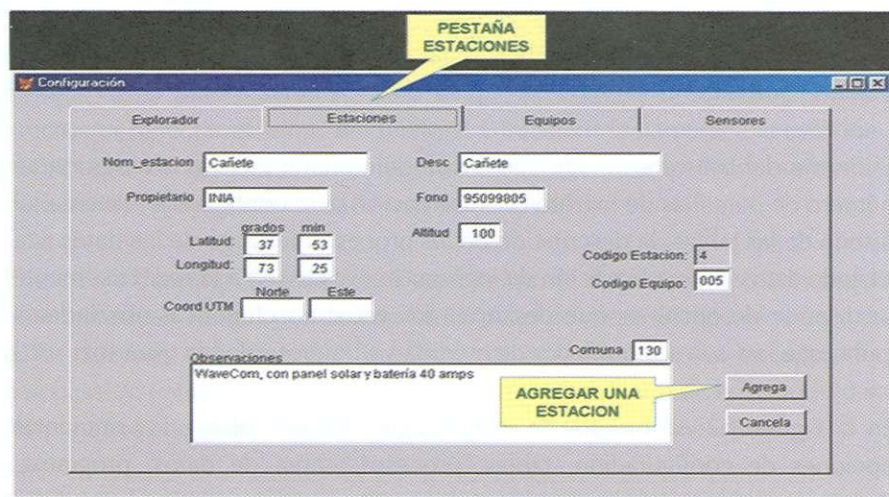


Figura 1.3. Ventana que posibilita ingresar e identificar nuevas estaciones que integren la red.



En la Figura 1.4 se muestra la ventana que permite identificar y describir nuevos procesos para generar información específica requerida por los usuarios.

**Procesos**

Pantalla **Datos** Horario Programación

**PESTAÑA DATOS PROCESOS**

Código: 0000

Usuario: jccruz

Tipo Proceso:

- ☐ Interno
- ☐ Externo
- ☒ Carga datos
- ☐ Redundante

Nro Cola: 1

Equipo: 001

Inicio: 01/01/2003

Término: 12/31/2003

Tiempo (s):

Descripción:

Nombre: c:\windows\notepad.exe

Salida:

Mail:

Dirtrab: c:\sistemas\simet

Ventana:

**BOTON AGREGA PROCESO**

Agrega Modifica Elimina

Figura 1.4 Ventana para definir nuevos procesos.

El sistema ofrece, además, definir por parte del usuario la hora a la que desea se ejecute un determinado proceso, para ello se han definido intervalos de 15 minutos, estas opciones se encuentran en la opción horario de la ventanilla de procesos (Figura 1.5).

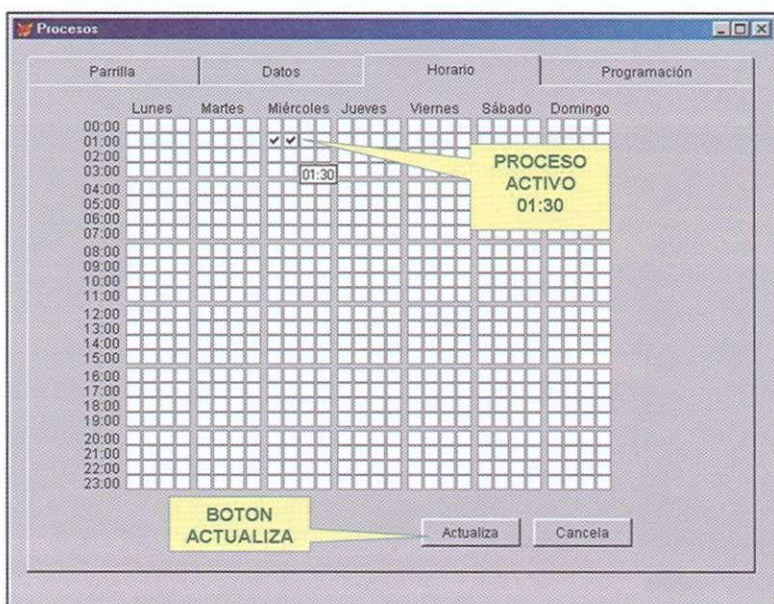


Figura 1.5. Ventana de opción horaria de procesos.

### 1.2.6. Página web

- La herramienta que se ha desarrollado para presentar y difundir el trabajo de la red se ha concentrado en el diseño de una página web en el sitio <http://www.aclimat.cl> con los productos que se elaboran a partir del contenido de la base de datos meteorológica. Está alojado en Windows 2000 server con IIS (Internet Information Server).
- Está construida sobre el lenguaje HTML, los procesos de conexión a la base de datos están escritos en lenguaje ASP (Active Server Pages).
- ASP contiene dos herramientas que ayudan al trabajo en ambiente web, que son VisualScript que permite la conexión con la base de datos y JavaScript que apoya el trabajo gráfico, con objetos programables.



- d) Para la emisión de reportes el sitio cuenta con programas ejecutables, contruidos en el lenguaje Visual Basic 6.0, y su función es generar previamente los reportes más requeridos.
- e) El sitio cuenta con un sistema de claves de ingreso para usuarios registrados al sistema. Para el usuario común existe información general y reportes de tipo gráfico.
- f) En la Figura 1.6 se muestra la página de inicio del sitio, en la que se presenta el mapa de la VIII Región y los puntos donde se ubican las EMA's, además se tiene un menú que permite ver las opciones de consulta a las que puede acceder quien la visita.

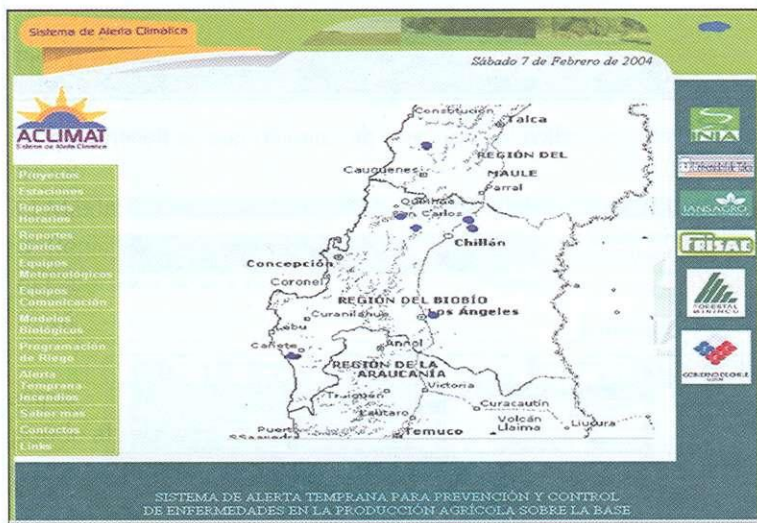


Figura 1.6. Página de inicio del sitio <http://www.aclimat.cl>

Entre las opciones que ofrece el menú están los reportes horarios y los reportes diarios, tal como se observa en las Figuras 1.7 y 1.8, respectivamente.

**Sistema de Alerta Climática**

Sábado 7 de Febrero de 2004

### REPORTES HORARIOS

| Seleccione Estación                            | Seleccione Variable       | Seleccione Reporte : Con datos de saltos de 1 Hora o 45 Min.                                                                                           |                 |
|------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Santa Rosa                                     | Temperatura del aire      | AYER                                                                                                                                                   | ULTIMOS 3 DIAS  |
| Cauquenes                                      | Precipitación             |                                                                                                                                                        |                 |
| Portezuelo                                     | Humedad relativa del aire | ULTIMA SEMANA                                                                                                                                          | ULTIMOS 15 DIAS |
| San Carlos                                     | Radiación Solar           |                                                                                                                                                        |                 |
| Cafete                                         | Velocidad del Viento      |                                                                                                                                                        |                 |
| Humén                                          | Dirección del Viento      |                                                                                                                                                        |                 |
| San José                                       |                           |                                                                                                                                                        |                 |
| Huón                                           |                           |                                                                                                                                                        |                 |
| <input type="button" value="Selecciona Todo"/> |                           | O introduzca el Inicio y Termin:<br>En formato dd/mm/aaaa:<br>Inicio: 1 / 1 / 2004<br>Termin: 1 / 1 / 2004<br><input type="button" value="CONSULTAR"/> |                 |

Figura 1.7. Página que indica las opciones de consulta que se tienen como reportes horarios.

**Sistema de Alerta Climática**

Sábado 7 de Febrero de 2004

### REPORTES DIARIOS

| Seleccione Estación                            | Seleccione Variable            | Seleccione Reporte : Con datos estadísticos de un día                                                                                                  |                 |
|------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Santa Rosa                                     | Temperatura Min. del aire      | AYER                                                                                                                                                   | ULTIMOS 7 DIAS  |
| Cauquenes                                      | Temperatura Med. del aire      |                                                                                                                                                        |                 |
| Portezuelo                                     | Temperatura Max. del aire      | ULTIMOS 15 DIAS                                                                                                                                        | ULTIMOS 30 DIAS |
| San Carlos                                     | Humedad relativa Min. del aire |                                                                                                                                                        |                 |
| Cafete                                         | Humedad relativa Med. del aire |                                                                                                                                                        |                 |
| Humén                                          | Humedad relativa Max. del aire |                                                                                                                                                        |                 |
| San José                                       | Velocidad Min. del Viento      |                                                                                                                                                        |                 |
| Huón                                           | Velocidad Med. del Viento      |                                                                                                                                                        |                 |
|                                                | Velocidad Max. del Viento      |                                                                                                                                                        |                 |
|                                                | Dirección Min. del Viento      |                                                                                                                                                        |                 |
| <input type="button" value="Selecciona Todo"/> |                                | O introduzca el Inicio y Termin:<br>En formato dd/mm/aaaa:<br>Inicio: 1 / 1 / 2004<br>Termin: 1 / 1 / 2004<br><input type="button" value="CONSULTAR"/> |                 |

Figura 1.8. Página que indica las opciones de consulta que se tienen como reportes diarios.

Una opción que ofrece la página web es la entrega de la información meteorológica mediante planillas de texto, planilla electrónica Excel, además de mostrar el comportamiento de las variables mediante una modalidad gráfica tal como se muestra en la Figura 1.9.

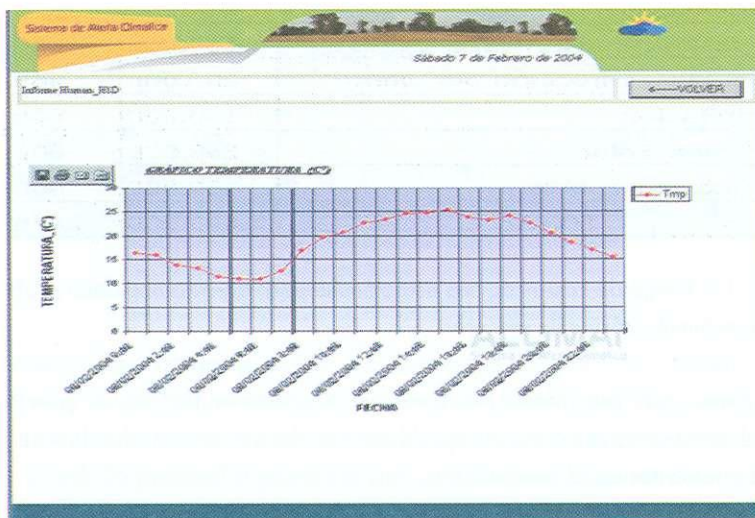


Figura 1.9. Ventana que muestra la modalidad de presentación de los datos mediante gráficos.

### 1.3. ESTIMACIÓN DE COSTOS POR EMA (SIN CONSIDERAR LA REPOSICIÓN DE EQUIPOS)

Costos promedios de implementación y operación de una EMA comunicada por telefonía celular con una recolección diaria de los datos desde el servidor.

Para realizar este cálculo se han considerado las siguientes partidas de costos:

- a) **Equipo meteorológico.** La valoración del equipamiento meteorológico de una EMA se ha hecho incluyendo un Datalogger de configuración abierta, la estructura de soporte y un conjunto de sensores definidos como básico y



que incluyen: Temperatura, Humedad Relativa, Radiación, Pluviometría, Velocidad y Dirección Viento (Cuadro 1.1).

| COMPONENTE                              | DESDE            | HASTA            |
|-----------------------------------------|------------------|------------------|
| <b>DATALOGGER</b>                       | <b>600.000</b>   | <b>1.300.000</b> |
| <b>SENSORES</b>                         |                  |                  |
| <b>Temperatura y Humedad relativa</b>   | <b>180.000</b>   | <b>450.000</b>   |
| <b>Velocidad y Dirección del Viento</b> | <b>600.000</b>   | <b>860.000</b>   |
| <b>Precipitación</b>                    | <b>100.000</b>   | <b>600.000</b>   |
| <b>Radiación Solar</b>                  | <b>250.000</b>   | <b>600.000</b>   |
| <b>Estructura soporte</b>               | <b>100.000</b>   | <b>360.000</b>   |
| <b>TOTAL</b>                            | <b>1.830.000</b> | <b>4.170.000</b> |

Cuadro 1.1. Rango de costos de una estación meteorológica automática profesional con equipamiento básico de sensores.

Los valores más elevados corresponden a sensores de mayor precisión y calidad, pero sin que esto signifique disponer del instrumental más sofisticado que se encuentra en el mercado.

- b) **Hardware de comunicación.** El ítem comunicaciones comprende el hardware necesario para que se pueda comunicar en forma remota el datalogger con el computador que actúa como servidor central. Esto incluye la adquisición del MODEM, la antena y el cable de conexión específico para cada datalogger. Al respecto es importante indicar que de no existir la información acerca de cómo se debe configurar el MODEM, ésta debe ser hecha por un técnico que domine este tipo de comunicaciones. En el Cuadro 1.2 se muestra una estimación de costos por este concepto.

| Ítem                       | Cantidad | Total (\$)     |
|----------------------------|----------|----------------|
| <b>MODEM</b>               | <b>1</b> | <b>150.000</b> |
| <b>Conexión</b>            | <b>1</b> | <b>25.000</b>  |
| <b>Antena</b>              | <b>1</b> | <b>18.000</b>  |
| <b>Configuración módem</b> | <b>1</b> | <b>100.000</b> |
| <b>TOTAL</b>               |          | <b>293.000</b> |

Cuadro 1. 2. Costos de la unidad de comunicación.

- c) **Sistema de energía.** Un tema relevante es definir el sistema de alimentación de la energía que utilizará la estación y el sistema de comunicación que, en el caso de no disponer de energía eléctrica de 220 Volt, debe optar por un sistema de paneles solares que recargan una batería que alimenta la unidad de comunicación y el datalogger (Cuadro 1.3).

| Item                    | Cantidad | \$/u   | Total          |
|-------------------------|----------|--------|----------------|
| Panel solar 22 watt     | 1        |        | 160.000        |
| Batería 12 V-7 AH       | 2        | 23.000 | 46.000         |
| Regulador de carga 12 V | 1        |        | 22.000         |
| <b>TOTAL</b>            |          |        | <b>228.000</b> |

Cuadro 1.3. Estimación de costo de la unidad de energía.

- d) **Servicio de comunicación.** La contratación de los servicios de comunicación incluyen el costo fijo mensual para cada EMA junto al costo de la llamada diaria para bajar los datos de cada una de las estaciones de la red. En promedio se estima que una llamada requiere de 3 minutos. sin embargo, no siempre se logra la comunicación en el primer intento, lo que requiere hacer llamadas adicionales. Por ello se ha definido que se requieren del orden de 40 minutos mensuales, lo que se resume en el Cuadro 1.4.

| Item                              | Cantidad     | \$/u  | Total (\$)   |
|-----------------------------------|--------------|-------|--------------|
| Valor fijo mensual                | 1            |       | 3.900        |
| Costo llamada 3 minutos           | 1            | 135   |              |
| Costo llamadas por mes            | 40 (minutos) | 5.400 | 5.400        |
| <b>TOTAL MENSUAL POR ESTACION</b> |              |       | <b>9.300</b> |

Cuadro 1.4. Estimación de costo de la comunicación utilizando telefonía celular.

- e) **Supervisión de las estaciones.** Es necesario considerar a lo menos una visita mensual para asegurar el correcto funcionamiento de las estaciones, dado que se pueden presentar dificultades de funcionamiento del hardware de comunicación, del datalogger y de los sensores, además de fallas de energía que afecten la toma de datos. En el Cuadro 1.5 se presenta el resumen de los costos por concepto de supervisión.

| ITEM                | COSTO (\$)    |
|---------------------|---------------|
| <b>Visita</b>       | <b>10.000</b> |
| <b>Movilización</b> | <b>15.000</b> |
| <b>Peajes</b>       | <b>5.000</b>  |
| <b>TOTAL</b>        | <b>30.000</b> |

Cuadro 1.5. Estimación de los costos promedio por visita de supervisión a una EMA dependiente de la red.

## 1.4. PRODUCTOS APORTADOS POR LA RED

Los productos que genera una red de EMA's se construyen sobre la base de lo que se almacena en la base de datos, la que reúne los valores que se registran de cada uno de los sensores que tienen las estaciones que integran la red.

El valor de una base de datos meteorológicos proviene de la cantidad de datos registrados respecto del número de variable y del periodo para el que se tiene el registro, lo que se puede expresar como la cantidad de datos disponibles. El otro parámetro para evaluar una base de datos es la información respecto de la calidad del dato de que se dispone.

La calidad del dato depende de una serie de factores como la calidad y estado de la estación y sus sensores, además de las condiciones de instalación en el terreno de cada una de las EMA's que integran la red.

Respecto de la calidad del producto aportado por una red de EMA's, es importante tener presente que una red de estaciones meteorológicas puede entregar tres tipos de productos: números, datos e información.

### 1.4.1. Números

Corresponde a los valores aportados por los sensores, registrados en la base de datos, que provienen de equipos que no se han calibrado. Por lo tanto, no existe un respaldo técnico que demuestre que estos corresponden efectivamente a la magnitud de la variable que mide.



### **1.4.2. Datos**

Corresponde al valor almacenado en la base de datos y que representa el comportamiento real de la variable que se mide. Para ello es necesario que cada uno de los sensores esté debidamente calibrado y, además, sea chequeado en forma permanente y sistemática. Sólo en esta condición se puede afirmar que el valor deja de ser un número y se convierte en un dato, de tal manera que cuando el valor de la variable temperatura indica 10°C se puede afirmar que la temperatura medida por ese sensor y en ese momento era realmente 10°C.

### **1.4.3. Información**

Esto significa que el producto aportado no sólo es un dato que siendo real y exacto no permite describir un proceso. Por lo tanto, la generación de información requiere que los datos se integren en función de determinados fenómenos, mediante el desarrollo de modelos biológicos matemáticos que describan procesos. Entre éstos están los modelos de alerta temprana de enfermedades que integran datos meteorológicos respecto del comportamiento de una planta y del patógeno que es el agente causal de la enfermedad que se desea monitorear. De igual forma se dispone de los modelos de alerta de programación de riego que permiten monitorear los requerimientos de riego de un cultivo mediante el uso de datos meteorológico de suelo y de la planta. Otro ejemplo de este tipo de aplicaciones lo constituyen los modelos de alerta temprana de incendios forestales que integran datos climáticos y de estado del material combustible presente en el bosque.

## **1.5. CONDICIONES DE INSTALACIÓN DE UNA EMA**

### **1.5.1. Punto geográfico donde instalar una EMA**

Respecto de la ubicación del punto específico en que se instalará una EMA y que busca monitorear las condiciones climáticas del área, la que puede abarcar 10 ó más kilómetros a la redonda, se exige evitar la presencia de

cualquier accidente natural o artificial que altere el comportamiento de las variables a medir por los sensores de la estación. A continuación se presenta una breve síntesis de los requerimientos de instalación de los sensores más comunes.

- a) **Sensor de velocidad y dirección del viento.** Es necesario que su ubicación sea en un punto promedio para el área de interés, donde el viento fluya libremente y que no sea obstaculizado por la presencia de edificios, árboles o en posiciones topográficas que no represente la condición promedio del área para la que se desea extrapolar la información aportada por la estación, como el fondo de una quebrada o la cúspide de un cerro.
- b) **Sensores de temperatura y humedad relativa del aire.** El sensor debe estar ubicado en una condición donde exista una adecuada circulación del aire, alejado de fuentes de agua como charcas o terrenos de vega donde las condiciones circundantes son distintas a lo que se observa en el resto del área. De igual manera, se deben evitar sectores protegidos que puedan alterar la condición térmica del punto donde se ubica el sensor.
- c) **Sensor de radiación solar.** Como el objetivo de este sensor es medir la cantidad de radiación que proviene del sol, es importante que en ninguna hora del día y durante los 365 días del año no reciba sombra de objetos naturales o artificiales que se ubiquen en las cercanías de la estación.
- d) **Sensor de precipitación.** La ubicación de este sensor debe ser tal que, al llover y con viento soplando en cualquier dirección, la caída de las gotas de lluvia se produzca libremente sobre el pluviómetro, evitando que las gotas sean desviadas por la presencia de otros sensores u obstáculos naturales o artificiales.

### 1.5.2. Altura a la que se ubican los sensores en una EMA

Respecto de la altura de instalación de los sensores en la estación, dependerá del tipo de uso que se darán a los datos. Por ello será siempre importante

que, al solicitar información meteorológica, se incluyan los antecedentes que describan las condiciones de instalación de la estación y los sensores en el terreno. A continuación se describen tres tipos de estaciones:

- a) **Estación de referencia para fines de riego.** En este caso se recurre a las indicaciones que plantea Penman Monteith para efectos de monitoreo de los requerimientos de riego de los cultivos, definiendo que los sensores deben ubicarse a una altura de 2 m.
- b) **Estación para estudios de clima.** En este caso se opta por la instalación de sensores a 10 m.
- c) **Estación para el monitoreo del viento.** Se suele disponer de sensores instalados a diferentes alturas, llegando incluso a tener torres con sensores a 40 m de altura.

## CAPÍTULO 2

### **REDES AGROMETEOROLÓGICAS Y SISTEMAS DE ALERTA EN ESTADOS UNIDOS**

*Autores*

**Gary Secor / Viviana Rivera**

Plant Pathology, Universidad  
Estatad de North Dakota, EE.UU.

[gary.secor@ndsu.nodak.edu](mailto:gary.secor@ndsu.nodak.edu)

[viviana.rivera@ndsu.nodak.edu](mailto:viviana.rivera@ndsu.nodak.edu)

**John Enz**

Soil Science, Universidad Estatal  
de North Dakota, EE.UU.

[john.enz@ndsu.nodak.edu](mailto:john.enz@ndsu.nodak.edu)





Esta red se inició en el año 1989 con la cooperación del High Plains Climate Center (HPCC) de Lincoln, Nebraska. Originalmente comenzó con 6 estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en centros de investigación de la Universidad Estatal de North Dakota, con el objetivo de entregar datos meteorológicos utilizados en el desarrollo y manejo de varios cultivos, insectos y de modelos de diversas enfermedades. Los primeros agricultores en sumarse a este proyecto fueron un grupo de productores de la industria papera del valle del Río Rojo, en el año 1990. Así fue como entre el año 1993 y 1994 se desarrolló el modelo contra tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*). Luego, año a año, se fueron sumando nuevos agricultores y agroindustrias ligadas a otros rubros, lo que le ha permitido conformar una red con un total de 66 estaciones. Si bien esta red se creó con fines netamente agrícolas, en la actualidad hace un valioso aporte a muchas otras áreas.

## **2.1. MODALIDAD DE OPERACIÓN DE LA RED**

Diariamente, y a partir de la medianoche, se descargan los datos colectados a partir de las cero horas del día anterior. Esto se hace por medio de una conexión de telefonía fija al computador que administra la bajada de los datos. El programa lee e identifica, automáticamente, los datos perdidos y/o erráticos, reemplazándolos por una estimación de éste a partir de algoritmos y ecuaciones de regresión con las estaciones más cercanas. Éste es el primer control de calidad que se realiza, ya que además existe otro que incluye la revisión visual de los datos y que se hace día a día, en las mañanas, con el objetivo de identificar datos sospechosos y/o erráticos que el programa no halla detectado. El programa NDAWN y su sitio Web son administrados por un grupo de profesionales pertenecientes al Departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Estatal de North Dakota, además de la Oficina de Climatología de North Dakota, que también es parte del grupo NDAWN. Los encargados del sitio Web (NDAWN center) son del Departamento de Comunicación Agrícola.

El sistema y su sitio Web son administrados por Radu Carcoana, Bárbara Mahoney y John Enz quien es el encargado del equipo que vela por el correcto funcionamiento de la red. Todos ellos dependen del Departamento

de Ciencias del Suelo de la Universidad Estatal de North Dakota, además de Dallas Morlock, Eric Christeson y Roger Egeberg, los cuales hacen posible que la programación, descarga de datos y mantenimiento del sitio sean los óptimos.

La experiencia obtenida con el transcurrir de los años hizo aconsejable que se acordara una estandarización de los equipos que integraban la red. Lo anterior hizo que se seleccionara la estación marca Campbell (Figura 2.2), con sensores de temperatura del aire, temperatura de suelo, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, pluviometría, radiación solar, además de sensores que miden la presión barométrica del aire en 31 estaciones. El software utilizado para comunicarse con las estaciones meteorológicas es "Campbell loggernet 2.1c".

Las EMA's que integran la red tienen distinto origen, ya que 17 pertenecen a centros experimentales, 7 a productores de remolacha, 7 a productores de papa, 22 financiadas con el aporte de proyectos de investigación, además de 13 provenientes de aportes hechos por terceros.

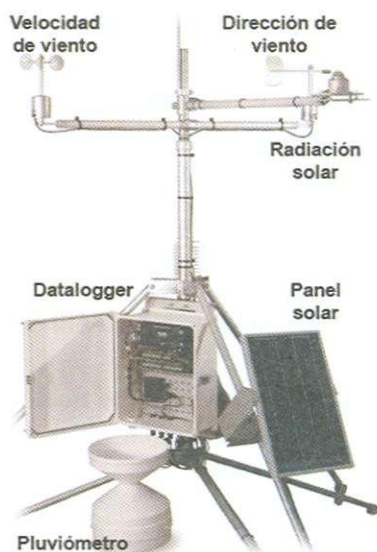


Figura 2.2. Estación meteorológica automática tipo, marca Campbell.

La medición y almacenamiento de datos se realiza por medio de los sensores y un almacenador de datos (datalogger). Así, cada estación realiza mediciones sistemáticas cada un minuto de: temperatura del aire, humedad relativa, temperatura del suelo, radiación solar y precipitación -promediándose éstas cada una hora- además del registro del valor máximo y mínimo de la temperatura, las precipitaciones, con una sensibilidad de 0,25 mm y registro cada 10 minutos.

## 2.2. INSTALACIÓN Y MANTENCIÓN

La ubicación de una estación meteorológica debe realizarse en lugares sin accidentes topográficos, planos, de superficies abiertas, evitando presencia de cultivos u otra estructura que pueda influir en la medición. Si las condiciones anteriores se cumplen, los datos meteorológicos obtenidos, deberían ser representativos de un área aproximada de 30 - 32 km a la redonda con respecto a la estación, excepto las precipitaciones, ya que éstas pueden variar enormemente de un punto a otro.

Para el óptimo funcionamiento de una estación se deben realizar, periódicamente, visitas de mantenimiento y calibración de sensores. Estas visitas debieran ser por lo menos una vez por año para comprobar: estado de cada una de las estructuras que componen la estación, existencia de roturas, presencia de malezas, etc. También se debe hacer un chequeo periódico en terreno de cada uno de los sensores con una estación patrón, con sus sensores previamente calibrados para este fin. También es importante mencionar que todos los sensores tienen una vida útil, la cual dependerá del tipo, fabricante, calidad y condiciones en las que opere. Como referencia se presentan a continuación algunos valores generales de la vida útil de los sensores.

- Dirección Viento: 2 años.
- Velocidad Viento: 4 años
- Humedad Relativa: 1 a 2 años.
- Radiación solar: 4 años.
- Precipitaciones: 3 a 4 años.
- Temperatura del aire: 2 años.
- La revisión de un Datalogger debería realizarse cada: 4 a 5 años.

- Respecto de los paneles solares, la mantención debe ser periódica y evitar que se afecte su eficiencia por daños o suciedad que afecte su cubierta.

La experiencia demuestra que un mantenimiento preventivo minimiza la pérdida de datos, aumenta su calidad y reduce el número de visitas a terreno. En resumen, una disminución de costos.

## **2.3. COMUNICACIÓN REMOTA**

La comunicación remota con una EMA puede hacerse de varias formas, pero lo habitual es que sea mediante telefonía, fija o celular.

Al momento de hacer la elección deben analizarse los problemas más habituales que presenta cada caso. En primer lugar está la telefonía celular, la cual tiene la facilidad de disponibilidad en lugares que no existe líneas telefónicas. Pero sí presenta problemas de confiabilidad de conexión en ciertos lugares donde la cobertura no es la óptima, además de problemas en ciertos días y horarios de alto tráfico. En segundo lugar está la telefonía fija, la cual es de conexión mucho más segura y confiable, pero requiere cercanía a una línea telefónica y generalmente mayores costos de instalación. Es por esto que cada caso debe analizarse y evaluarse particularmente para, así, determinar cuál sistema es el más recomendable para determinadas condiciones.

## **2.4. SITIO WEB DE NDAWN**

La dirección del sitio es <http://www.ndawn.ndsu.nodak.edu>. En éste se puede identificar 4 áreas de información (Figura 2.3).

**1.a.** Sector superior. Nombre de la página y los logos institucionales de sus creadores.

**1.b.** Sector izquierdo. Opciones respecto de las áreas de interés para el usuario.

1.c. Sector central. Distribución de las estaciones en el Estado de Dakota del Norte.

1.d. Sector inferior. Menú de variables climáticas que se pueden visualizar en el sector central 1.c. Éstas son:

- Stations: Estaciones.
- Temp. Air: Max/Min.: Temperaturas máximas y mínimas en cada estación.
- Temp. Air Avg.: Temperaturas promedio del aire.
- Temp. Soil: Temperatura del suelo.
- Wind Speed: Velocidad del viento.
- Wind Direction: Dirección del viento.
- Wind Chill:
- Rainfall: Pluviometría.
- Solar Radiation: Radiación solar
- Relative Humidity: Humedad relativa.
- Dew Point: Puntos de rocío.
- Potencial ET: Eevapotranspiración potencial.

### Sector 1a

Home

What's New?

Overview »

Help

Disclaimer

Weather Data

Applications »

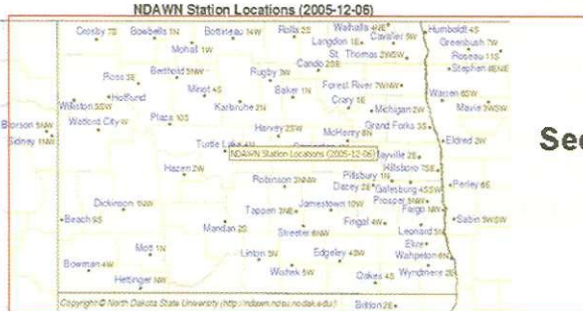
ND State Climatologist

Contact Us

Links

Log In

**NDAWN Station Locations (2005-12-06)**



Key: Station Name 9S = 9 Miles South of Town

Select Weather Variable for December 6, 2005:

|                   |                |                   |                |
|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
| Stations          | Wind Speed     | Solar Radiation   | < Previous Day |
| Temp. Air Max/Min | Wind Direction | Relative Humidity |                |
| Temp. Air Avg     | Wind Chill     | Dew Point         | Next Day >     |
| Temp. Soil        | Rainfall       | Potential ET      |                |

**Sector 1c**

### Sector 1d

Figura 2.3. Áreas de información de la página principal del sitio Web.

A continuación se describe, en forma resumida, el contenido de las opciones que se incluyen en el menú principal que se ubica en el sector izquierdo de la página (Sector 1.b).

2.4.1. Home.

Muestra la página principal del sitio Web (Figura 2.4).

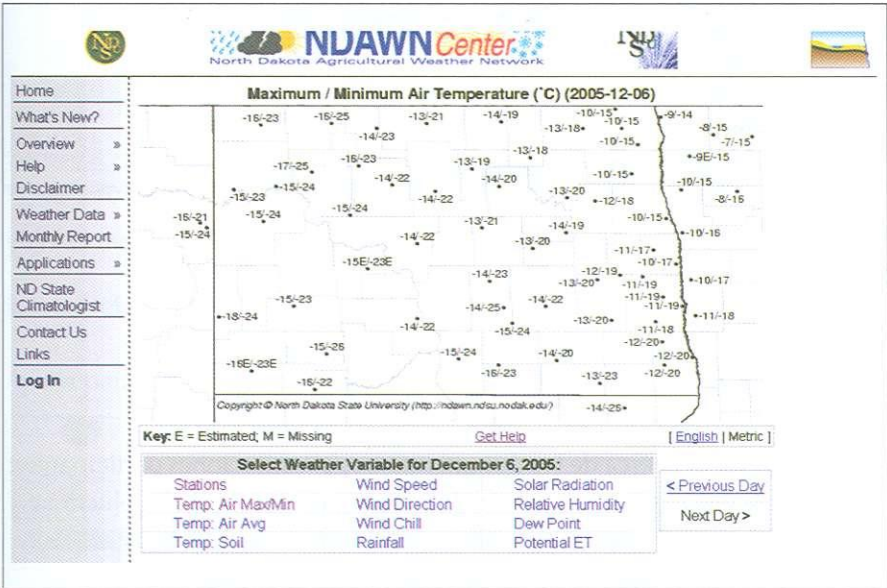


Figura 2.4. Página principal con la opción digitada de la presentación del mapa de la red, con las temperaturas máximas y mínimas del aire para cada zona.

2.4.2. What's new

Aquí se accede a los cambios más recientes realizados en el sitio Web de NDAWN center (Figura 2.5).



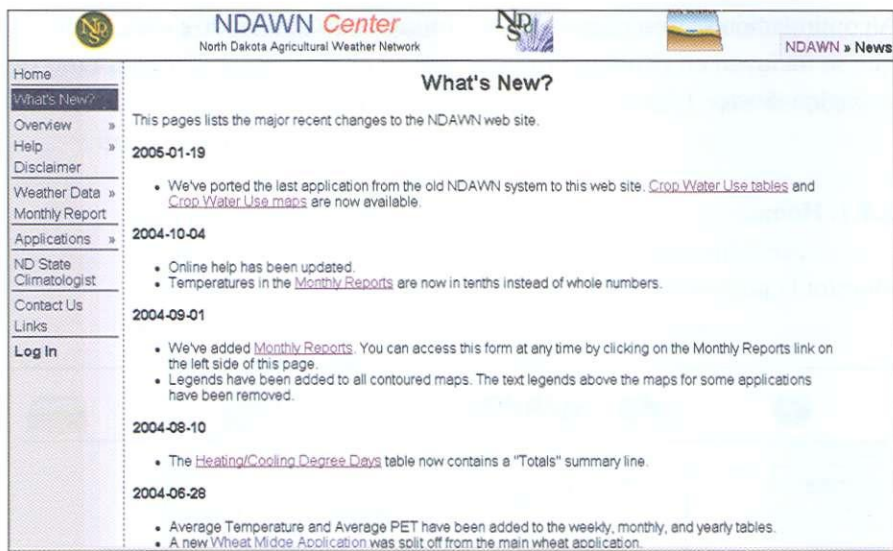


Figura 2.5. Acceso a los cambios más recientes realizados en el sitio Web de NDAWN Center.

### 2.4.3. Overview

Son descripciones acerca de los distintos centros e instituciones participantes; historia de la red, sus inicios; personal, financiamiento, ayuda involucrada; y misión del sistema (Figura 2.6).

- Network Overview: Descripción de la red.
- Acknowledgements: Agradecimientos a los distintos centros e instituciones participantes.
- History: Historia de la red, sus inicios.
- Personnel, Funding, and Cooperators: Personal, financiamiento y ayuda involucrada en el sistema.
- Mission: Misión del sistema NDAWN.





**NDAWN Center**  
 North Dakota Agricultural Weather Network

**NDAWN » Overview**

---

[Home](#)  
[What's New?](#)  
[Overview](#) »  
[Help](#) »  
[Disclaimer](#) »  
[Weather Data](#) »  
[Monthly Report](#) »  
[Applications](#) »  
[ND State Climatologist](#)  
[Contact Us](#)  
[Links](#)  
[Log In](#)

## Network Overview

The North Dakota Agricultural Weather Network (NDAWN) consists of 67 stations distributed across North Dakota, and portions of surrounding states. Through careful site selection it is assumed each station represents the weather conditions except rainfall, in a 20-mile (32 km) radius area. Stations are identified by a number and letter(s) following the name indicates the distance in miles north or south of the town. For example, Leonard 5N means the station is located about 5 miles north of Leonard.

Each station provides data for all variables and hourly maximum wind speed plus daily summaries consisting of maximum and minimum air temperature, maximum wind speed, times of occurrence, and various totals or averages for all other variables in English or metric units. Measured and calculated variables and more complete descriptions of each may be found in the [site description](#) and [archived data](#) areas.

Data are retrieved via telephone modem shortly after midnight each day. A computer program identifies missing or erroneous values which are replaced by estimates calculated from data at surrounding stations. Following this initial quality control (QC) data are loaded into the NDAWN data base and made available to the general public via the NDAWN web site free of charge. Every Monday thru Friday morning, except holidays, data from all stations are visually compared in order to identify suspicious or erroneous data that the computer program cannot detect. In addition, weekly and monthly average data are similarly compared to identify possible calibration or other problems. For more info see [QC](#).

NDAWN and the NDAWN Center are operated by the NDAWN team housed in the [Department of Soil Science \(DSS\)](#) at [North Dakota State University](#). The North Dakota State Climatologist Office is part of the NDAWN team. Programmers housed in the [Department of Agriculture Communication](#) continue to improve and refine this NDAWN web site daily.

Since its inception in 1989, all NDAWN equipment, non-labor operational costs, and some labor costs have been

Figura 2.6. Descripción general de la red.

#### 2.4.4. Help

Ayuda para facilitar la navegación, definiciones, etc. (Figura 2.7).





**NDAWN Center**  
 North Dakota Agricultural Weather Network

**NDAWN » Home Page**

---

[Home](#)  
[What's New?](#)  
[Overview](#) »  
[Help](#) »  
[Disclaimer](#) »  
[Weather Data](#) »  
[Monthly Report](#) »  
[Applications](#) »  
[ND State Climatologist](#)  
[Contact Us](#)  
[Links](#)  
[Log In](#)

## Home Page Help

**Home Page Overview:** The home page consists of several interrelated features.

**Home Page Overview**

- Drop-down menus. Located at the top of the page.
- Select Weather Data for "Yesterday": Variable from table below, Get map of yesterday's data for all stations. Repeat as often as you wish.
- English / Metric: Choose English or Metric units.
- <Previous Day | Next Day>: for map of previous days data. for map of next days data.
- Point to map location: Station Name pops up.
- Click map location: Get data table for that station and date.

**Options:**

- Point to map location: Station Name pops up.
- Click map location: Get data table for that station and date.

**Options:**

- Choose English or Metric units.
- <Previous Day | Next Day>: for map of previous days data. for map of next days data.
- Point to map location: Station Name pops up.
- Click map location: Get data table for that station and date.

**NDSU Logo** (Upper left corner): Link to NDSU Home Page

**NDSU Agriculture Logo** (Upper right corner): Link to NDSU Agriculture.

Figura 2.7. Opciones de ayuda para quien visita la página.

a) **Home Page Help (Ayuda en página principal).**

- Home Page Overview (Descripción de la página principal).
- Sidebar Menu (Menú).
- Home Page MAP (Mapa de la página principal).
- Select Weather Data for Yesterday (Selección de datos meteorológicos del día anterior).
- English/Metric (Escala inglesa o métrica).
- Previous Day/Next Day (Día anterior o siguiente).
- Station Links (Vínculos).
- Time Date (Fecha y hora).

b) **Data information.**

- Data Use and Source Documentation (Uso de los datos y fuentes de documentación).
- Data Availability (Disponibilidad de datos).
- Data Units (Unidades de medida de los datos).
- Time and Date Standard (Fecha y hora estándar).
- Variables and Measurements (Medidas y variables).
- Data Summarization (Datos acumulados).
- Data Quality Control (Control de calidad de datos).
- Data Export (Exportación de datos).
- Climatic Normals (Normales climáticas).
- Instantaneous Data (Datos instantáneos).
- Variable and Normal Definitions (Definiciones de variables y normales).

c) **Variable Definitions (Definiciones de Variables).**

- Station Site and Equipment Description (Ubicación y descripción de la estación meteorológica).
- Topography (Topografía).
- Description (Descripción).
- Equipment and Sensor Overview (Descripción de equipos y sensores).
- Sensors Details (Detalle de sensores).

d) **Application Help (Ayuda en las distintas aplicaciones).**

- Weather Data Table Forms (Tablas de datos meteorológicos).
- Weather Data Maps Forms (Mapas de datos meteorológicos).
- Barley (Cebada).
- Canola (Raps).
- Corn (Maíz).
- Heating/Cooling Degree Days (Grados días Horas de frío).
- Sugarbeet Growing Degree Days (Grados día en remolacha).
- Sugarbeet Cercospora (Cercosporiosis en remolacha).
- Sunflower (Maravilla).
- Wheat (Trigo)

## 2.4.5. Weather data

Datos meteorológicos, horarios, mensuales semanales, anuales, etc., disponibles a la forma de tablas o mapas (Figura 2.8).

The screenshot shows the NDAWN Center website interface. The header includes the NDAWN Center logo and the text 'North Dakota Agricultural Weather Network'. The main content area is titled 'Hourly Data Map' and contains a form with three sections: '1. Select variable:', '2. Select time period:', and '3. Get data:'. The '1. Select variable:' section has a dropdown menu with options: 'Hourly', 'Choose a Time Period', 'NWS Daily Normals', 'NWS Monthly Normals', and 'Help'. The '2. Select time period:' section has a 'Date:' field with the value '2005-12-06' and a 'Hour (CST):' dropdown with the value '100'. The '3. Get data:' section has a 'Submit' button. The left navigation menu includes links for 'Home', 'What's New?', 'Overview', 'Help', 'Disclaimer', 'Weather Data', 'Monthly Report', 'Applications', 'ND State Climatologist', 'Contact Us', 'Links', and 'Log In'. The 'Weather Data' link is highlighted, and a dropdown menu is visible with options: 'Tables', 'Maps', 'Hourly', 'Choose a Time Period', 'NWS Daily Normals', 'NWS Monthly Normals', and 'Help'. The 'Tables' link is also highlighted. The footer includes copyright information for 2000-2005 North Dakota State University and logos for W3C CSS and XHTML 1.0.

Figura 2.8. Datos meteorológicos, horarios, mensuales, semanales, anuales, a la forma de Tablas o Mapas.

a) **Tables (Representación de datos en tablas)**

- Hourly (Horarios).
- Daily (Diarios).
- Weekly (Semanales).
- Monthly (Mensuales).
- Yearly (Anuales).
- NWS Daily Normals.
- NWS Monthly Normals.
- Help (Ayuda).

b) **Maps (Representación de datos en mapas).**

- Hourly (Horarios).
- Cose a time Period.
- NWS Daily Normals.
- Nws Monthly Normals.
- Help (Ayuda).

## 2.4.6. Applications

Aplicaciones en los diferentes cultivos, insectos, etc., disponibles a la forma de tabla o mapa (Figura 2.9).

a) **Barley (Cebada).**

- Degree Days/Growth Stages (Grados día/Etapas de desarrollo).
- Help: Degree Days/Growth Stages (Ayuda).

b) **Canola (Raps).**

- Degree Days/Growth Stages (Grados día/Etapas de desarrollo).
- Help: Degree Days (Ayuda).
- Sclerotinia.

c) **Corn (Maíz).**

- Degree Days (Grados día).
- Help: Corn Degree Days (Ayuda).

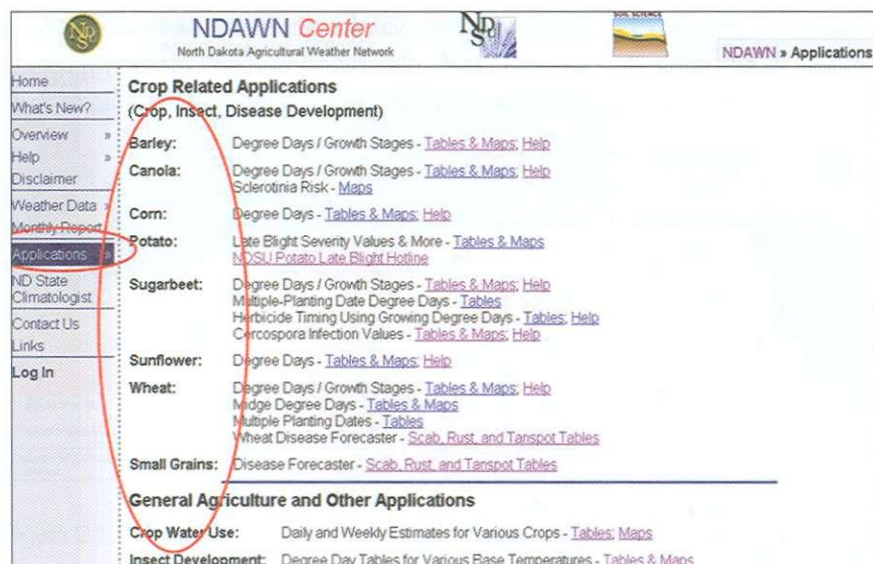


Figura 2.9. Aplicaciones en cultivos, enfermedades y otros, disponibles a la forma de tabla o mapa.

d) **Potato (Papa).**

- Late Blight (Tizón Tardío)
- NDSU Potato Late Blight Hotline (Línea caliente).

e) **Sugarbeet (Remolacha).**

- Degree Days/Growth Stages (Grados día/etapas de desarrollo).
- Help: Sugarbeet Degree Days (Ayuda).
- Multiple Planning Dates (Fechas múltiples).
- Herbicide Timing Using GDD (Uso de herbicidas).
- Help: Herbicide Timing Guidelines (Ayuda).
- Cercospora Infection Values (Figura 2.10). (Valores de Infección).
- Help: Cercospora Infection Values (Ayuda).

La Figura 2.10 presenta la opción de si las condiciones climáticas son más o menos favorables para el desarrollo de esta enfermedad, transformándose en un sistema de alerta, respecto de la necesidad de realizar una aplicación de



funguicidas. En este caso se presentan los valores acumulados desde el 15 de junio al 30 de septiembre del año 2005, observándose con coloración roja la zona con mayores probabilidades de presentar un ataque de la enfermedad.

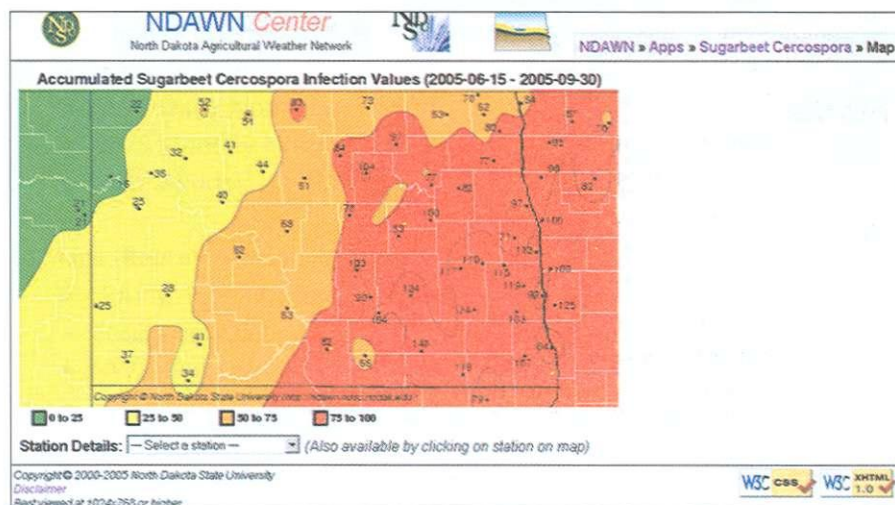


Figura 2.10. Valores de infección acumulados en una determinada fecha, representados a la forma de mapa coloreado según probabilidad de infección.

#### f) Sunflower (Maravilla).

- Degree Days/Growth Stages (Figura 2.11). (Grados día/Etapas de desarrollo).
- Help: Sunflower Degree Days (Ayuda).

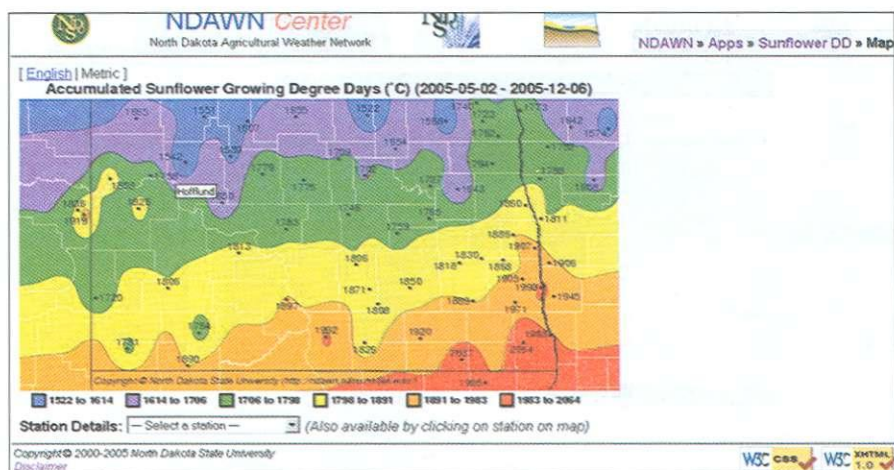


Figura 2.11. Grados día acumulados en el cultivo de maravilla a la forma de mapa.

#### g) Wheat (Trigo).

- Degree Days/Growth Stages (Grados día/etapas de desarrollo).
- Help: Degree Days (Ayuda).
- Multiple Planning Dates (Fechas múltiples).
- Midge Degree Days.
- Disease Forecaster (Pronosticadores de enfermedades).

#### h) Small Grains (Granos).

#### i) Crop Water Use (Figura 2.12). (Uso del agua por los cultivos).

- Tables (Tablas).
- Maps (Mapas).

**NDAWN Center**  
North Dakota Agricultural Weather Network

Home  
What's New?  
Overview  
Help  
Disclaimer  
Weather Data  
Monthly Report  
Applications  
ND State  
Climatologist  
Contact Us  
Links  
Log In

**Crop Water Use Table**

[Get a crop water use map](#)

**1. Select station(s):**

**2. Select crop(s):**

Alfalfa (\*)  
Barley  
Corn  
Dry Bean  
Potato  
Soybean  
Sugarbeet  
Sunflower  
Turf Grass (\*)  
Wheat

[select all](#)

(\*) = Green up date is always Apr. 15, so emergence date is ignored for alfalfa and turf grass

**3. Select emergence date:**

The emergence date must be April 15 or later

Emergence date: 2005-05-01

**4. Select time period:**

Jump to crop water use data for this year:

last 4 days last 7 days  
last 10 days last 14 days

seasonal summary

April May June  
July August September

OR

Enter begin and end dates (YYYY-MM-DD)

Begin date: 2005-12-06  
End date: 2005-12-06

**Submit**

Copyright © 2000-2005 North Dakota State University

WSC CSS WSC XHTML

Figura 2.12. Uso de agua por los cultivos, a la forma de mapa o tabla.

#### j) Insect (Insectos).

- Degree Days (Grados día).

#### k) Heating/Cooling.

- Degree Days (Grados día).
- Help: Degree Days (Ayuda).

### 2.4.7. ND State climatologist

Link al sitio Web oficial del centro de climatología de North Dakota (Figura 2.13).



Figura 2.13. Link al sitio Web oficial del centro de climatología de North Dakota.

## 2.4.8. Contact us links

Vínculos con sitios relacionados (Figura 2.14).

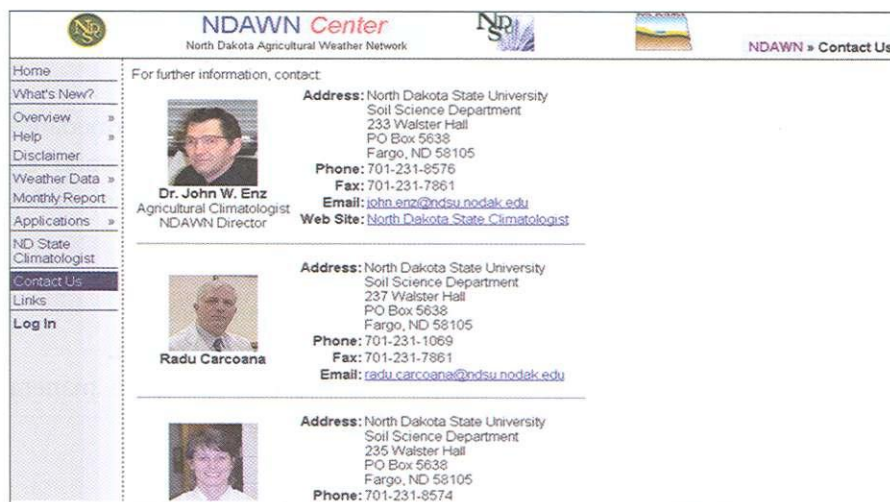


Figura 2.14. Contactos con los principales profesionales a cargo del sistema.



## 2.4.9. Links

Vínculos a sitios relacionados.

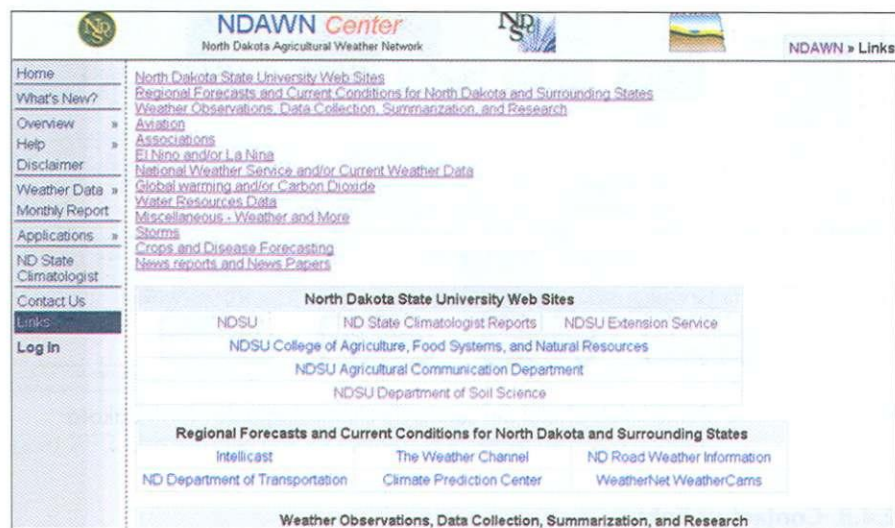
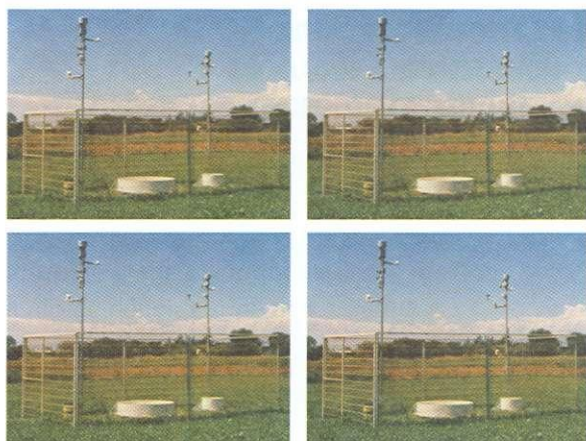


Figura 2.15. Vínculos relacionados.

## 2.5. CONCLUSIONES

- El uso de información meteorológica en el pronóstico de enfermedades y seguimiento del crecimiento de los cultivos ha proliferado en los últimos años, ya que posee grandes ventajas e innumerables aplicaciones.
- Puede ser usada para cualquier enfermedad.
- Su adecuado uso se potencia mediante los computadores.
- Su mayor limitante es la topografía de una determinada zona.
- Es una excelente herramienta, pero es imprescindible, de manera paralela, las visitas y revisiones periódicas al cultivo.



# Estaciones Meteorológicas Automáticas



## CAPÍTULO 3

### **DESCRIPCIÓN DE SENSORES Y COMPONENTES ASOCIADOS A UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA**

*Autor*

**Américo Orlando Franco F.**

Ingeniero Civil Agrícola.

Universidad de Concepción.

Facultad de Ing. Agrícola.

Chillán, Chile.

afranco@udec.cl

La necesidad de contar con información en agricultura, como en cualquier otra área del conocimiento, es fundamental para fines de programación de riego-sólo por poner un ejemplo- donde los parámetros y variables meteorológicas juegan un rol muy relevante (humedad relativa, temperatura, radiación, velocidad de viento, entre otros). Para almacenar y recolectar estos datos, históricamente se ha necesitado de un observador meteorológico en cada estación, con el consiguiente riesgo de introducir errores humanos en el proceso de lectura. El desarrollo tecnológico actual ha permitido automatizar el proceso mediante la transmisión remota de los datos y el almacenamiento de éstos en un formato digital.

Las estaciones de meteorología modernas tratan de automatizar las mediciones de lectura de datos para obtener información más detallada, mejorando así el análisis de cada una de las variables climáticas, además de disminuir los requerimientos de mano de obra y generar nuevas aplicaciones que contribuyan y apoyen los procesos productivos en lo que estos se insertan.

El interés del sector silvoagropecuario de participar de los beneficios del mundo moderno y globalizado necesita comprometerse en un audaz desafío, que permita poner a disposición de este sector de la economía los beneficios de los avances científicos y tecnológicos que estimulen y proyecten su crecimiento. En esa senda es necesario conocer las disciplinas y los elementos de que se dispone para lograr tales desafíos. Al respecto, esta presentación hace un análisis detallado de los elementos que integran una estación meteorológica automática (EMA), como elemento tecnológico que se difunde como una herramienta de gran utilidad en el monitoreo del comportamiento del clima para generar información aplicada que apoye el manejo y la gestión de los procesos productivos.

## **3.1. DEFINICIONES**

### **3.1.1. Sensor**

Dispositivo que recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica, la que se transforma a una escala de medida acorde a la variable

que se desea monitorear. Es importante señalar que los sensores pueden ser activos o pasivos.

- a) **Sensor activo.** Sensor que requiere una fuente externa de excitación (RTD o celdas de carga).
- b) **Sensor pasivo.** Sensor que no requiere una fuente externa de excitación (termoclupa).

### 3.1.2. Datalogger

Instrumento electrónico que lee y graba los valores que entregan los sensores conectado a él y que puede incluir sensores de temperatura, humedad relativa, radiación, etc. Esto lo realiza en forma sistemática y acorde a una frecuencia de registro de los datos de acuerdo a las necesidades del usuario. Los dataloggers normalmente tienen microprocesador, memoria para el almacenamiento de los datos y fuente que provee la energía. Además, poseen una interfase para comunicarse con una computadora personal. En equipos más sencillos disponen de una pantalla que muestra los datos y/o gráficos que mide, por medio de un software específicamente desarrollado para cada equipo.

## 3.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

### 3.2.1. Ley de Ohm

La diferencia de potencial en los extremos de un conductor es directamente proporcional a la intensidad de corriente que circula por éste. Además, esa corriente implica una caída de tensión y, por consiguiente, una pérdida de energía.

Ley de Ohm:  $V = I \cdot R$

Donde:

$V$  = Voltaje (V)

$A$  = Corriente (A)

$R$  = Resistencia ( $\Omega$ )

Los dispositivos electrónicos permiten la transferencia y procesamiento de la información por medio de la energía electromagnética. Si bien existe una gran diversidad de estos dispositivos, se considera al diodo unión como el padre de la electrónica.

### 3.2.2. Diodo unión

Los bloques fundamentales sobre los cuales se basan todos los semiconductores son la unión P-N o Diodo de Unión. La unión se forma juntando físicamente los semiconductores de tipo P, y los del tipo N. Los semiconductores de tipo P son dopados con galio y por cada átomo reemplazado queda una carga positiva o hueco disponible. Los semiconductores de tipo N son dopados con arsénico y por cada átomo reemplazado queda un electrón libre para moverse. De la Figura 3.1 se puede concluir que el sentido de la corriente es en el sentido P a N.

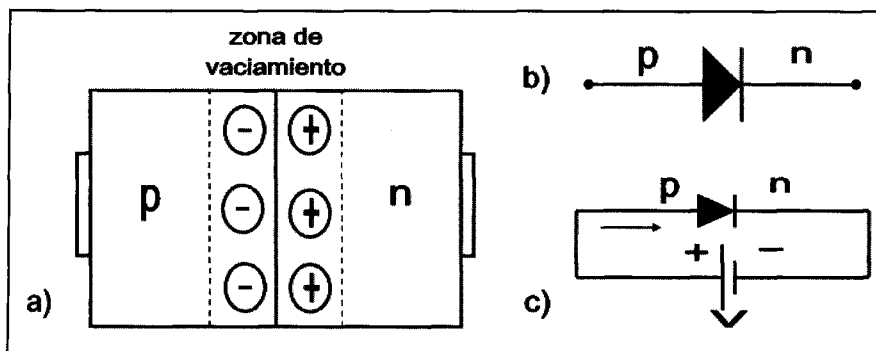


Figura 3.1. Esquema que indica como está constituido un diodo a), el símbolo b) y la dirección en la que fluye la corriente c).

### 3.3. SISTEMA DE MEDICIÓN SENSOR-DATALOGGER

La finalidad última de un sensor es la medida de algún parámetro físico. En general, un sistema de medición se puede dividir en las secciones indicadas en el diagrama de bloques de la Figura 3.2.

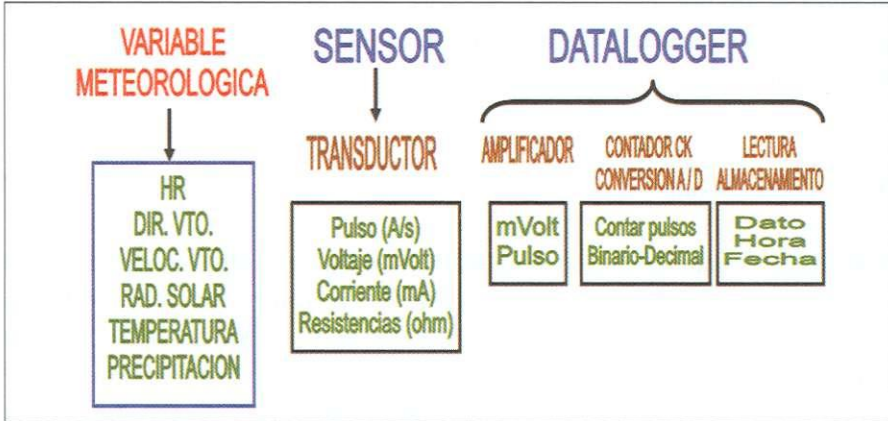


Figura 3.2. Diagrama que muestra las secciones presentes en un sistema de medición y adquisición.

#### 3.3.1 Variable meteorológica

Es el parámetro físico que se desea conocer. Por lo general, se recomienda saber bien la unidad y la sensibilidad que se requiere para la aplicación deseada.

#### 3.3.2. Sensor

- Transductor.** Un transductor es un dispositivo que entrega un parámetro eléctrico que es una función del parámetro físico que se está midiendo. A menudo esta relación es lineal. Por ejemplo, el cambio de resistencia (parámetro eléctrico) de un termistor (Transductor) es directamente proporcional a la temperatura en un determinado rango en el cual se hace funcionar el sensor.

### 3.3.3. Datalogger

- b) **Amplificador.** Prosiguiendo con el diagrama, a menudo es necesario amplificar la señal, para lo cual los datalogger están dotados de este dispositivo, cuya función principal es que mediante la utilización de energía externa, incrementa la potencia de la señal proveniente del transductor o sensor.
- c) **Conversor de señal o contador de pulsos.** Tiene como objetivo central dejar en condiciones de digitalizar el valor de la variable que se desea medir, transformando una señal análoga en digital (Conversión A/D). No obstante, algunas señales requieren ser contadas, como las señales de pulso, y son derivadas a otro circuito preparado para dichas condiciones (Contador CK).
- d) **Lectura y/o almacenamiento.** La lectura puede consistir en presentar los valores en un panel digital o pantalla y/o la codificación adecuada para ser transferidas a otro computador en formato digital. El almacenamiento es la opción que ofrecen la mayoría de los dataloggers que se comercializan en la actualidad. Esta característica debe ser muy bien analizada cada vez que se desea adquirir un datalogger, ya que al no estar conectada en forma remota, su capacidad debe ajustarse a la cantidad y frecuencia de variables a medir junto a la frecuencia con que se extraerán los datos desde el datalogger.

## 3.4. TIPOS DE SENSORES ASOCIADOS A UNA EMA

Los sensores más utilizados en una EMA son:

- a) Temperatura del Aire (°C).
- b) Humedad Relativa del aire (%HR).
- c) Radiación Solar (w/m<sup>2</sup>).
- d) Precipitación (mm).
- e) Velocidad del Viento (m/s).
- f) Dirección del Viento (° grados).



### 3.4.1. Temperatura del aire (°C)

Casi todas las propiedades eléctricas de un material varían con la temperatura, por lo cual, en principio, se podría asumir que es posible utilizar cualquiera de ellos para la construcción de un sensor de temperatura. Sin embargo, los requerimientos de operación de estos sensores en lo que respecta a la sensibilidad, reproducibilidad y linealidad, tamaño y costo, limitan considerablemente los tipos de materiales que se pueden utilizar. En síntesis, es fácil construir un sensor de temperatura, pero su construcción se hace más compleja y de costos más elevados al requerirse datos de mayor exactitud y replicabilidad.

A continuación, algunos tipos de Sensores de Temperatura.

- a) **Termopares.** Los termopares utilizan la tensión generada en la unión de dos metales en contacto térmico, debido a sus distintos comportamientos eléctricos. En la práctica, la unión de dos metales más un circuito de compensación permiten la medición de este parámetro con bastante exactitud. En la Figura 3.3 se muestra un circuito integrado de compensación de termocupla (a) y una gráfica de linealidad de distintas termocuplas (b).

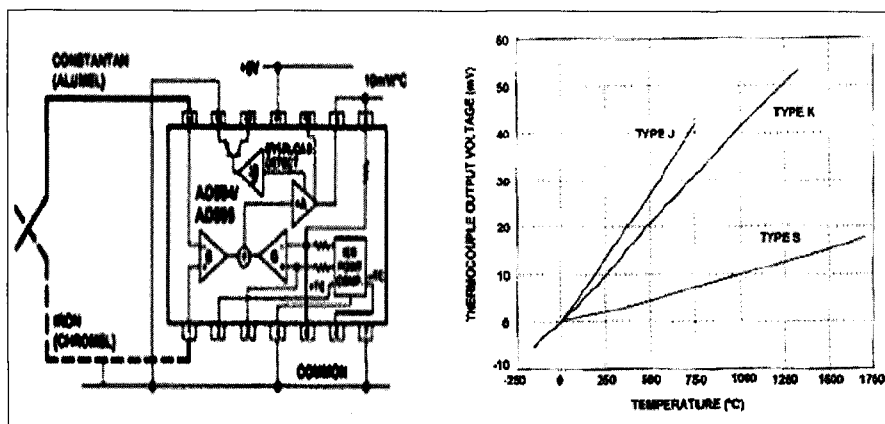


Figura 3.3. Circuito (a) y comportamiento eléctrico de una termocupla (b).

- b) **Resistivos.** Estos transductores poseen un elevado coeficiente de temperatura, por lo que el valor de resistencia del semiconductor varía en forma considerable. Existen en distintas formas, tamaños y magnitudes eléctricas.

Los más conocidos son los RTD (Resistance Temperature Detector) o PT100 basadas en la dependencia de la resistividad de un conductor con la temperatura. Están caracterizadas por un coeficiente de resistividad positivo PTC (Positive Thermal Coefficient). También lo son las NTC (Negative Thermal Coefficient) que se llaman termistores y están caracterizadas por un coeficiente de temperatura negativo. En las gráficas de la Figura 3.4 se muestra cómo varía el valor de la resistencia con respecto de la temperatura y, además, se muestra una forma de linealizar la curva de comportamiento de un termistor.

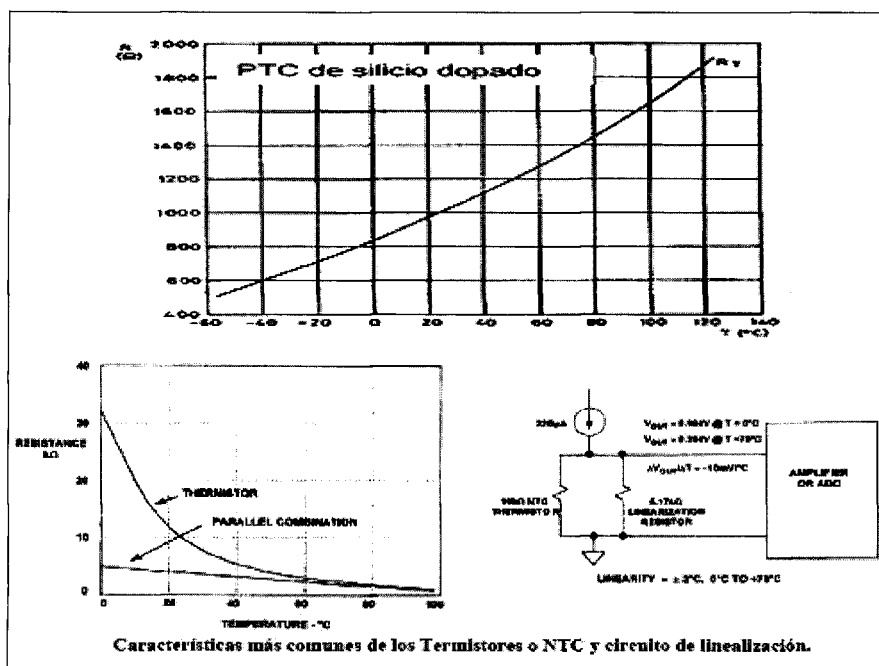


Figura 3.4. Características más comunes de los termistores o NTC y circuitos de linealización.

En la Figura 3.5 se muestra el símbolo de un termistor (a), un circuito de conversión de parámetro eléctrico (resistencia) a una señal eléctrica (voltaje) (b), fotografías de termistores comerciales para un uso inmediato, y termistores en su forma natural (c).

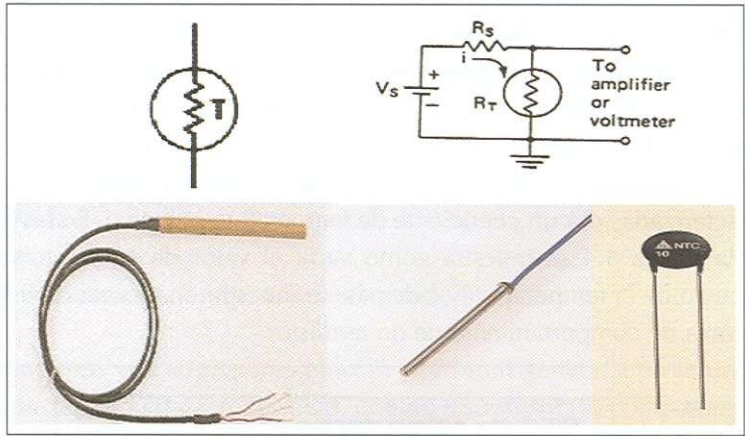


Figura 3.5. Símbolo, esquemas y fotos de termistor.

c) **Semiconductores.** Los sensores de circuitos integrados resuelven el problema de linealidad y ofrecen altos niveles de rendimiento. Además, son bastante precisos a temperatura ambiente. La gran mayoría se basan en la variación de la conducción de una unión p-n polarizada directamente.

En la Figura 3.6 se muestra un semiconductor de temperatura, su alimentación en un circuito, una fotografía y antecedentes técnicos del componente.

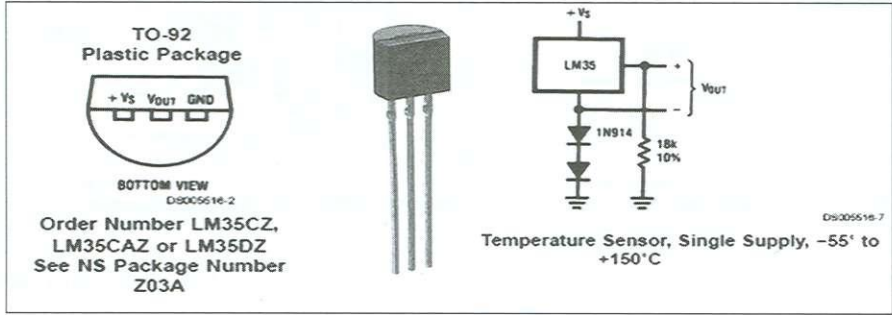


Figura 3.6. Sensor de temperatura del tipo semiconductor.

Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/° C scale factor  
0,5° C accuracy guaranteeable (at +25 °C)
- Rated for full -55° to +150° C range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than 60 µA current drain
- Low self-heating, 0.08° C in still air
- Nonlinearity only ± ¼ °C typical
- Low impedance output, 0.1 Ω for 1 mA load

En la Figura 3.7 se muestra un sensor de temperatura y humedad relativa para una estación meteorológica automática de alta calidad. El fabricante proporciona una hoja técnica del sensor en donde se encuentra información, accesorios de montaje y protección (a) y antecedentes como desempeño del sensor, rango de medida, error y polinomio de conversión a dato de temperatura en °C (b).

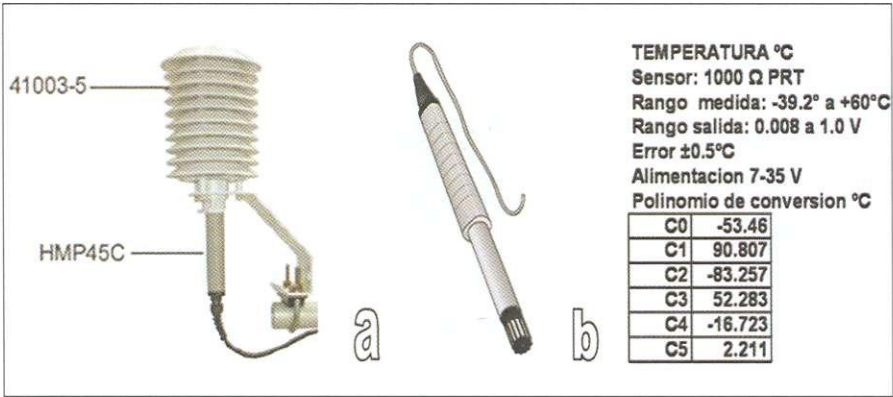


Figura 3.7. Sensor de temperatura y humedad relativa HMP45C-L.

### 3.4.2. Humedad relativa del aire (%HR).

La mayoría de estos sensores operan en base a la absorción de agua en una superficie recubierta con una sustancia higroscópica en contacto con el gas, cuya humedad se requiere medir.

- a) **Sensores de Humedad Resistivos.** Un electrodo polímero montado en tandem censa la humedad en el material. Además, un circuito acondicionador y linealizador dan una salida estándar.
- b) **Sensores de Humedad Capacitivos.** El sensor lo forma un condensador de dos láminas de oro como placas y como dieléctrico una lámina no conductora que varía su constante dieléctrica, en función de la humedad relativa.

En la Figura 3.8 se presenta un sensor de humedad relativa donde se muestra el material con que fue elaborado (a), una fotografía (b), una gráfica que muestra el comportamiento de la señal eléctrica con respecto a la humedad (c), además de antecedentes técnicos del sensor proporcionados en la hoja técnica del fabricante. Son tensión de alimentación 5V dc, escala de medida de 0 a 100 %HR, precisión de  $\pm 2\%$  y funcionamiento  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$  y otros.

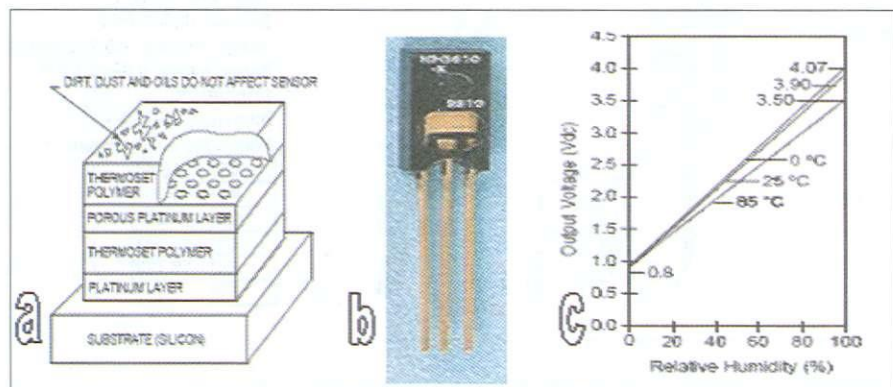


Figura 3.8. Detalles de construcción y comportamiento de un sensor de humedad relativa.

En la Figura 3.9 se muestra un sensor de humedad relativa para una estación meteorológica automática de alta calidad. El fabricante proporciona antecedentes técnicos del sensor junto al accesorio de montaje y protección.

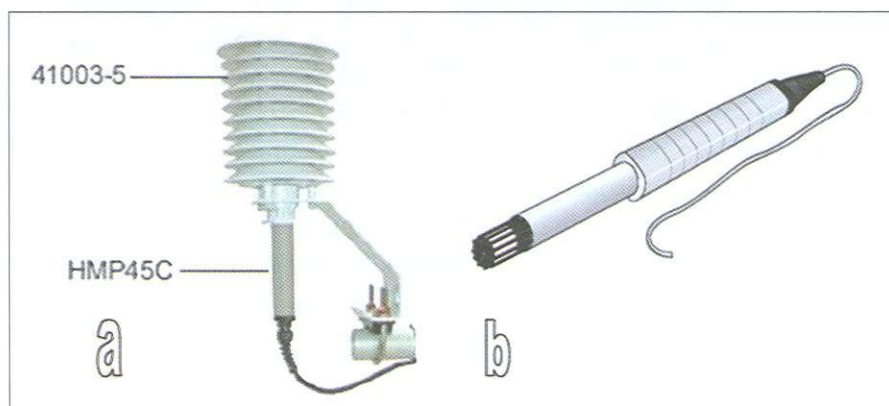


Figura 3.9. Estructura (a) y sensor (b) de temperatura y humedad relativa HMP45C-L.

### 3.4.3. Radiación solar ( $\text{Wm}^{-2}$ )

Existen dos tipos de sensores de radiación solar:

- El primero basado en una termopila que se funda en la ley de Stefan Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante emitida por la superficie de un cuerpo aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, es decir, EMBED Equation.3.
- El segundo tipo se basa en detectores que involucran un efecto cuántico, en el cual la energía del fotón debe tener energía suficiente para liberar un electrón venciendo la energía de la unión química. En lo práctico, se refiere a que la intensidad luminosa producida por los fotones del sol, entregue una potencia aproximada a la radiación solar.



El siguiente sensor, que se presenta en la Figura 3.10, se construye utilizando el 2º principio. Su funcionamiento consiste básicamente en que el sensor entrega una señal de corriente eléctrica que es proporcional a la radiación solar. El fabricante además entrega una resistencia eléctrica que permite que esa intensidad se transforme en señal eléctrica. Se entrega el multiplicador a incorporar en el seteo del datalogger, conforme a la unidad de medida que el usuario desee utilizar (a). También se muestra el circuito eléctrico que representa el modelo eléctrico del sensor (b), y una fotografía del sensor instalado en forma horizontal (c). Para ello, al momento de su instalación, se debe dejar bien nivelado con el nivel de burbuja que posee el piranómetro. La información que entrega el fabricante en la hoja técnica es la siguiente: sensor de rango 0 – 3000 Wm<sup>-2</sup>, resistencia de carga 147 ohms para voltaje de salida, error ±2% y otros.

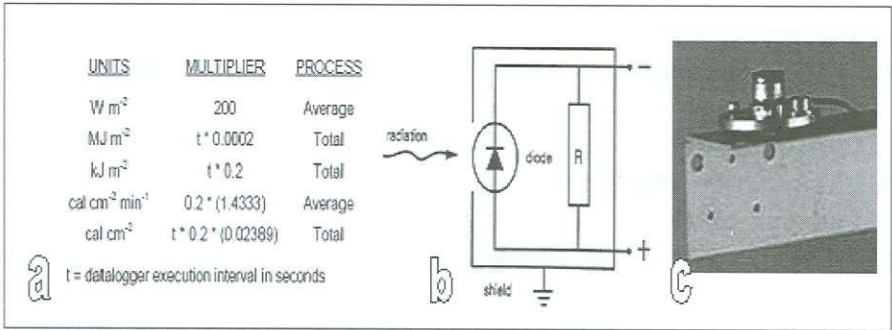


Figura 3.10. Detalles de un sensor de radiación.

En la Figura 3.11 se muestra un sensor desnudo que podría ser utilizado para medir radiación (a), una representación esquemática de la transformación eléctrica debido a los fotones de la radiación (b), además los componentes de la radiación (directa y difusa) (c).

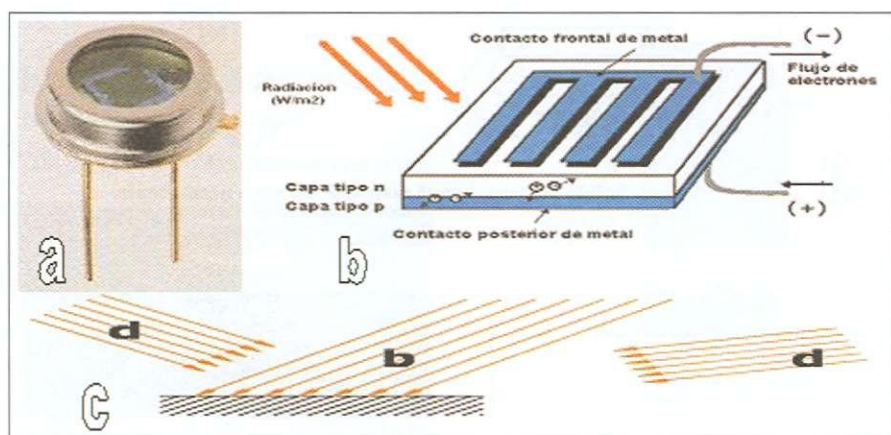


Figura 3.11. Detalles para la construcción de un sensor de radiación.

### 3.4.4. Precipitación

El mecanismo que permite la medición de la precipitación es un receptáculo de balancín que oscila al llenarse con agua uno de sus extremos. Los más comunes tienen una sensibilidad de 0,25 mm de lluvia. Cada vez que el balancín cae hacia uno u otro lado, genera una señal de pulso que es registrada por el datalogger, siendo generalmente dos los principios que más se utilizan:

- Mecanismo de pulso que utiliza como principio un switch Figura 3.12 (a) (contacto por el balanceo del receptáculo con agua), como forma de transmitir el pulso que significa un evento y, por consiguiente, el equivalente a una determinada cantidad de agua caída.
- Mecanismo que utiliza el principio de inducción de Faraday Figura 12 (b), donde un imán pasa por un mecanismo que permite inducir un pulso capaz de ser detectado por el datalogger, registrando el evento.

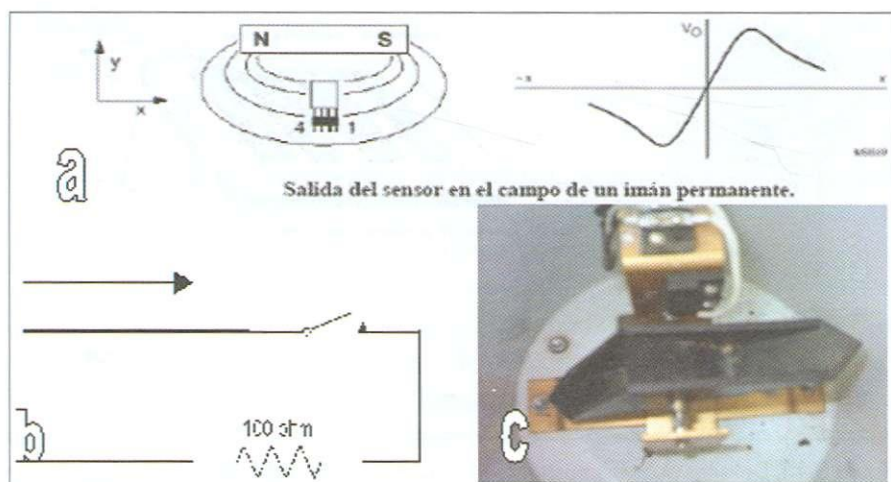


Figura 3.12. Principios (a) y (b) e imagen de detalle de un pluviómetro (c).

### Recipiente de cubo

Generalmente el pluviómetro incluye un mecanismo de vaciado similar a un embudo con dimensiones conocidas el que, a través del flujo del agua por éste, independientemente de la cantidad de lluvia, va llenando el mecanismo el que, por efecto del peso, tiende a caer hacia uno de los costados, provocando un pulso que se traducirá en una determinada cantidad de agua caída. Así, nuevamente comienza el llenado, pero del otro extremo del mecanismo, el que volverá a caer una vez lleno.

En la Figura 3.13 se observan las características típicas de un sensor de precipitación y sus componentes para un funcionamiento óptimo.

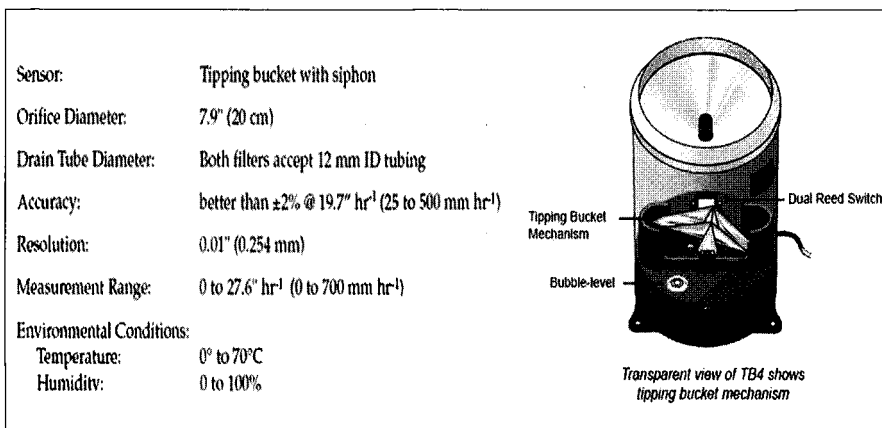


Figura 3.13. Especificaciones técnicas de un pluviómetro y visualización externa e interna de un pluviómetro tipo.

### 3.4.5. Velocidad del Viento ( $\text{ms}^{-1}$ )

En la Figura 3.14 se muestra un sensor que se compone por un volante rotatorio compuesto de tres tasas hemisféricas, convenientes para una gama amplia de mediciones del viento. Está fabricado, principalmente, de thermoplastic y su construcción proporciona excelente resistencia a la corrosión. El peso del sensor es bajo y la cantidad de partes mínimas a). La rotación del volante produce una señal de voltaje de corriente alterna (CA) sinusoidal que es directamente proporcional para el cálculo de la velocidad. Este voltaje de CA es inducido por un imán redondo bipolo montado en el eje de la taza. Un ciclo de la onda sinusoidal completa se produce para cada revolución de la taza como se muestra en (b).

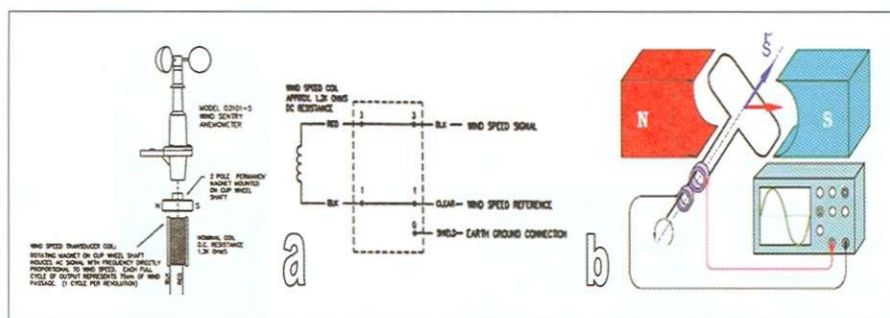


Figura 3.14. Mecanismo de funcionamiento de sensor de velocidad del viento.

En la Figura 3.15 se muestra las especificaciones técnicas de un sensor de velocidad del viento con sus componentes.

### Wind Speed (Anemometer) Specifications

|                                   |                                                                                                                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Range:                            | 0 to 50 m s <sup>-1</sup> (112 mph), gust survival 60 m s <sup>-1</sup> (134 mph)                                                |
| Sensor:                           | 12 cm diameter cup wheel assembly, 40 mm diameter hemispherical cups                                                             |
| Accuracy:                         | ±0.5 m s <sup>-1</sup> (1.1 mph)                                                                                                 |
| Turning Factor:                   | 75 cm (2.5 ft)                                                                                                                   |
| Distance Constant (63% recovery): | 2.3 m (7.5 ft)                                                                                                                   |
| Threshold:                        | 0.5 m s <sup>-1</sup> (1.1 mph)                                                                                                  |
| Transducer:                       | Stationary coil, 1350 ohm nominal resistance                                                                                     |
| Transducer Output:                | AC sine wave signal induced by rotating magnet on cup wheel shaft<br>100 mV peak-to-peak at 60 rpm; 6 V peak-to-peak at 3600 rpm |
| Output Frequency:                 | 1 cycle per cup wheel revolution; 0.75 m s <sup>-1</sup> per Hz                                                                  |
| Cup Wheel Diameter:               | 12 cm (4.7 in)                                                                                                                   |
| Weight:                           | 113 g (4 oz)                                                                                                                     |

Figura 3.15. Sensor de velocidad del viento y sus especificaciones técnicas.

### 3.4.6. Dirección del Viento (° grados)

La configuración general del sensor presenta una veleta de viento con un transductor (potenciómetro) de plástico conductivo de 10kΩ que genera un voltaje de excitación regulado. Un voltaje constante es aplicado al potenciómetro que entregará una señal correspondiente a un voltaje analógico directamente proporcional al ángulo de la dirección del viento.

El potenciómetro presenta una vida esperada de 50 millones de revoluciones, a 1 watt a 40° C y 0 watt a 125° C.

El sensor de viento tiene un umbral de 1,3 m/s (2.9 m. p. h.) a 10 ° de desplazamiento dependiendo del fabricante. El requerimiento máximo de excitación del transductor es de 15 volts.

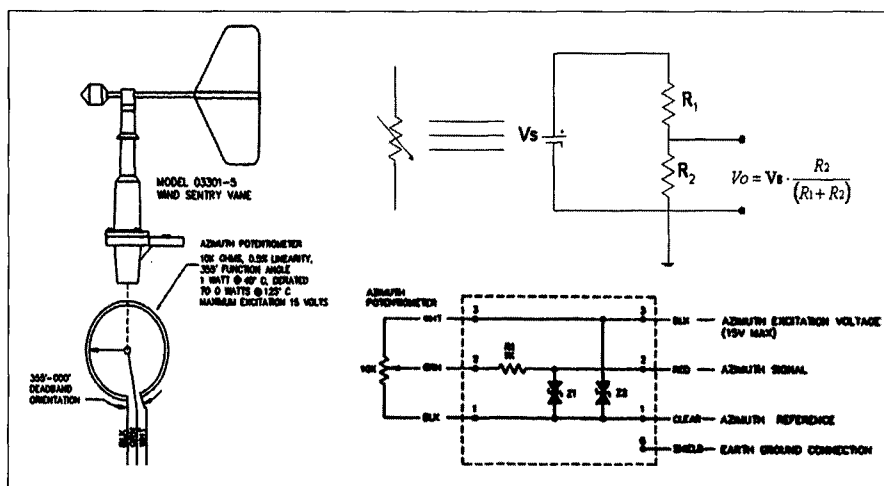


Figura 3.16. Mecanismo de funcionamiento del sensor de dirección del viento.

En la Figura 3.17 se muestra un sensor de dirección del viento con sus especificaciones técnicas y componentes.

Consideraciones para los sensores:

- i. Principio del sensor
- ii. Salida del sensor (mV, pulso,  $\Omega$ , I)
- iii. Alimentación del sensor (sólo si lo requiere)
- iv. Precisión
- v. Multiplicador de conversión
- vi. Costo



### **Wind Direction (Vane) Specifications**

|                                   |                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Range:                            | 360° mechanical, 355° electrical (5° open)                                                                                                                            |
| Sensor:                           | Balanced vane, 16 cm turning radius                                                                                                                                   |
| Accuracy:                         | ±5°                                                                                                                                                                   |
| Damping Ratio:                    | 0.2                                                                                                                                                                   |
| Delay Distance<br>(50% recovery): | 0.5 m (1.6 ft)                                                                                                                                                        |
| Threshold                         | 0.8 m s <sup>-1</sup> (1.8 mph) at 10° displacement<br>1.8 m s <sup>-1</sup> (4 mph) at 5° displacement                                                               |
| Transducer:                       | Precision conductive plastic potentiometer; 10 kohm resistance;<br>0.5% linearity; life expectancy 20 million revolutions.<br>Rated 1 watt at 40°C, 0 watts at 125°C. |
| Transducer Output:                | Analog dc voltage proportional to wind direction angle with regulated<br>excitation voltage supplied by the datalogger                                                |
| Vane Length:                      | 22 cm (8.7 in)                                                                                                                                                        |
| Vane Weight:                      | 170 g (6 oz)                                                                                                                                                          |

Figura 3.17. Sensor de dirección del viento y sus especificaciones técnicas.

|                        |                  |
|------------------------|------------------|
| <b>Temperatura</b>     | <b>± 0.3 °C</b>  |
| <b>Humeda Relativa</b> | <b>± 5%</b>      |
| <b>Radiacion Solar</b> | <b>± 5%</b>      |
| <b>Precipitacion</b>   | <b>± 0.2 mm</b>  |
| <b>Velocidad</b>       | <b>± 0.5 m/s</b> |

**Fuente DMC**

Figura 3.18. Tabla de errores o rango de error de cada variable meteorológica.

## CAPÍTULO 4

### **SISTEMAS DE CONTROL DE CALIDAD Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

*Autor*

**Roberto Hernández J.**

Meteorólogo Aeronáutico.

Dirección Meteorológica  
de Chile (D.M.C.).

robher@meteochile.cl

Los datos que diariamente suministran las estaciones agrometeorológicas son de gran importancia en diversas actividades. Una vez estudiados e interpretados, pueden aplicarse en dos grandes objetivos como son la prevención y la utilización.

La aplicación que tiene una variable meteorológica en el contexto de ciertas actividades, no necesariamente se refleja directamente, pues, ésta puede tener un gran espectro de destinos.

Dentro de la agricultura se pueden identificar distintas actividades que se ven afectadas por variables meteorológicas. A continuación se identifican las más importantes:

- a) Almacenamiento de agua.
- b) Manejo de calidad de productos agrícolas.
- c) Elección e introducción de nuevas especies agrícolas y animales.
- d) Establecimiento de épocas de siembra y cosecha.
- e) Manejo de plagas y enfermedades de plantas.
- f) Producción vegetal y animal.
- g) Pronóstico de cosecha.
- h) Programación de riego.
- i) Selección de zonas aptas para los cultivos.
- j) Uso y recuperación de tierras.

## **4.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

En la actualidad existe una amplia gama de instrumentos meteorológicos. La principal clasificación se realiza pensando en los elementos que se utilizan para medir o registrar las variables meteorológicas para las cuales fueron diseñados y por la forma de obtener esta información. Así, se pueden dividir en convencionales y electrónicos.

En el primer caso se usan instrumentos separados para cada variable meteorológica a medir. Por ejemplo, la temperatura ambiente se mide con

un termómetro de vidrio con mercurio en su interior, para la temperatura mínima se utiliza un termómetro de vidrio que en su interior contiene alcohol. En estos casos la única forma de obtener la información que entregan estos instrumentos es mediante el registro realizado por una persona, previamente capacitada para este fin.

En el caso de los sensores electrónicos, éstos se integran en un sistema llamado estación meteorológica automática (EMA). En este tipo, las mediciones no requieren de la presencia de un operador para obtener los datos. Normalmente esta información es acumulada y procesada por un sistema computacional (datalogger), con el que el usuario se encarga de comunicarse directamente, no existiendo limitaciones de distancia.

#### **4.1.1. Criterios para instalar una Estación Meteorológica**

En este aspecto se puede señalar que básicamente las necesidades del usuario son las que se contemplan para ubicar los instrumentos, situación que es posible justificar en casos especiales. Sin embargo, si atendemos los requerimientos que se deben cumplir para poder comparar y externalizar los datos obtenidos, se tiene que cumplir con ciertas normas preestablecidas. A su vez, dentro de estas normas existen variantes que se utilizan, dependiendo de las aplicaciones para las cuales se desean realizar las mediciones. En este caso, a nivel mundial la Organización Meteorológica Mundial (OMM), entrega orientaciones y justificaciones de porqué un determinado instrumento debe cumplir con ciertas normas de instalación y mantenimiento. Nuestro país, y específicamente la Dirección Meteorológica (D.M.C.), también utiliza estas normas.

### **4.2. CLIMA Y CLIMATOLOGÍA**

#### **4.2.1. Factores del clima**

Son determinadas condiciones físicas que controlan el clima como: Latitud, altitud, distribución de tierra y mar, topografía, corrientes oceánicas y otros.

### 4.2.2. Elementos del clima

Es cualquiera de las propiedades o condiciones de la atmósfera que, tomadas en conjunto, particularizan el estado físico del tiempo o del clima en un lugar y en un momento o período cronológico determinado (temperatura, precipitación, viento, radiación solar, etc.).

### 4.2.3. Concepto y escalas del clima

- a) **Clima.** Es una síntesis de las condiciones meteorológicas correspondientes a una determinada área, caracterizada por las estadísticas de las variables referentes al estado de la atmósfera, basadas en un período largo, en dicha área.
- b) **Macroclima.** Clima de una región geográfica extensa, de un continente o incluso de todo el mundo.
- c) **Mesoclima.** Clima de una región natural de pequeñas dimensiones (valle, bosque, etc.). La escala es intermedia entre la del microclima y la del macroclima.
- d) **Microclima.** Estructura del clima de escala pequeña en la capa atmosférica adyacente a una superficie determinada.

## 4.3. MANIPULACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

### 4.3.1. Archivos de entrada

Este proceso implica la selección y extracción, desde los documentos originales, de aquellos datos que son necesarios para incorporar al sistema.

### 4.3.2. Documentación de la estación

Información geográfica y de tipo administrativo, entre los que se encuentran el nombre oficial de la estación, su latitud, longitud y elevación, nombre y

dirección postal del observador o de la institución que coopera en el servicio observacional, programa oficial de observación, incluyendo las horas en las que se efectúan normalmente las observaciones e indicaciones acerca de la homogeneidad con relación a estaciones cercanas.

#### 4.3.3. Validación y corrección de errores

Dentro de la validación y corrección de los datos meteorológicos se pueden encontrar:

- a) **Control de calidad.** Error de Instrumento, de lecturas, de transmisión (Valores faltantes, magnitud, escalas, otros).
- b) **Pruebas de identificación e integridad.** Orden cronológico, incluir datos faltantes y relacionar parámetros asociados.
- c) **Pruebas de tolerancia.** Identificar límites para los diferentes parámetros, (Viento entre 0 y 360°, HR≤100%, otros).
- d) **Pruebas de consecuencia temporal.** Se pueden identificar magnitudes de cambio de un parámetro continuo, en un intervalo de tiempo.
- e) **Pruebas de consecuencia espacial.** Se puede utilizar para verificaciones, de acuerdo a un régimen climático, de los valores que difieren significativamente.

#### 4.4. ANÁLISIS DE DATOS

Este paso involucra las operaciones necesarias para producir un ordenamiento, combinación, comparación, cálculo y verificación de los datos. Los procesos más habituales y básicos son:

##### 4.4.1. Valor Promedio

Valor medio correspondiente a un determinado período cronológico (generalmente día, semana, década, mes o año).



#### **4.4.2. Amplitud**

Diferencia entre las temperaturas máxima y mínima o entre las temperaturas medias más altas y más bajas.

#### **4.4.3. Normales**

Medias periódicas, calculadas para un período uniforme y relativamente largo, que comprenda por lo menos tres períodos consecutivos de diez años.

#### **4.4.4. Normales climatológicas reglamentarias**

Medias de los datos meteorológicos calculados para los siguientes períodos consecutivos de 30 años: Ej. 01 de enero de 1931 al 31 de diciembre de 1960.

#### **4.4.5. Medias de los períodos**

Medias de los datos meteorológicos calculados para cualquier período de por lo menos diez años, que comience el 1 de enero de un año y que acabe en 1.

#### **4.4.6. Registro climatológico**

Cualquier inscripción registrada de un fenómeno meteorológico, expresado en forma alfanumérica, gráfica o cartográfica.

#### **4.4.7. Resumen climatológico**

Frecuencias anuales, promedios o totales, según el caso, de las observaciones efectuadas durante un año, acompañadas por otras estadísticas climatológicas pertinentes.

#### **4.4.8. Documentos de salida**

Generalmente, los productos finales que se entregan al usuario consisten en tabulaciones impresas en papel. Por lo tanto, es un requerimiento elemental que el diseño de salida sea legible, breve, comprensible y exacto.

#### **4.4.9. Archivos de salida**

Como principio, todas las observaciones básicas deberían ser preservadas a perpetuidad en un sistema de archivo, luego de haber pasado satisfactoriamente un control de calidad adecuado. Este archivo debe contener la identificación de cada estación (tipo, categoría, nombre, coordenadas geográficas, elevación, fecha inicio, instrumentos, elementos observados, entre otros), los cambios realizados en el emplazamiento, horarios de muestreo (sistema de horario usado), datos faltantes, relleno de series, tipo de control de calidad aplicado, etc.

#### **4.4.10. Estadísticas agroclimatológicas básicas**

El tipo de información meteorológica que se necesita varía en función del tipo de cultivo, su sensibilidad al medio ambiente, necesidades de energía y agua, etc. En la mayor parte de los casos, los datos pueden ser utilizados en diferentes procesos, mediante períodos de días, semanas, décadas, meses o años.

A continuación, se detalla el parámetro a trabajar y luego un listado de los diferentes procesos para generar productos derivados del parámetro.

## **4.5. PARÁMETROS METEOROLÓGICOS**

### **4.5.1. Temperatura del aire**

- a) Temperatura media diaria.
- b) Amplitud Térmica.
- c) Grados – día.
- d) Horas de frío.
- e) Horas del día dentro de un rango determinado de temperatura.
- f) Horas del día sobre o por debajo de una determinada temperatura.
- g) Temperatura máxima y mínima.
- h) Heladas.

### **4.5.2. Precipitación**

- a) Número de días con cantidades especificadas.
- b) Total acumulado de precipitación.
- c) Máxima en 24 horas.
- d) Registro de granizo y tormentas.
- e) Cálculo de déficit y superávit.
- f) Número de días con rocío.

La precipitación que se registra de acuerdo a las normas de la DMC, corresponde al total acumulado entre las 12 UTC de un día y las 12 UTC del día siguiente.

### **4.5.3. Viento**

- a) Velocidad y dirección predominante.
- b) Viento máximo.
- c) Cantidad de días con velocidad por sobre un umbral.

Tanto velocidad como dirección del viento deben ser tratados como un conjunto, aunque entre ambos existe una gran diferencia de lo que miden,

puesto que la dirección del viento corresponde a una referencia geográfica que indica de donde viene el viento, en cambio la velocidad corresponde a un valor de magnitud de la fuerza con que se desplaza.

#### **4.5.4. Humedad relativa**

- a) Número de días con determinados umbrales.
- b) Valores medios, máximo y mínimo.

#### **4.5.5. Evaporación de bandeja**

- a) Cantidad total.
- b) Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>).

La evaporación se debe registrar con la mayor precisión posible, puesto que esta información se utiliza como parte del cálculo de evapotranspiración potencial, dato importante a la hora de realizar la programación de riego de un cultivo. Teóricamente, el valor 0 (cero) no existe. Esto se debe, básicamente, a problemas con la forma de realizar las lecturas para medirla diariamente.

#### **4.5.6. Horas de sol**

- a) Cantidad total diaria.
- b) Promedio.

### **4.6. PROCESAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS**

#### **4.6.1. Tabulación de series climáticas**

Representación del comportamiento estadístico de las diferentes variables climatológicas, principalmente mediante el uso de gráficos, mediante los cuales se pueden realizar comparaciones entre distintos parámetros meteorológicos, como también, de un mismo parámetro en distintos períodos.

#### **4.6.2. Medidas de tendencia central**

Son la media, la mediana y la moda. La media es la suma de los valores de los elementos dividida por la cantidad de éstos. También es denominada promedio o media aritmética. La mediana es el valor del elemento intermedio cuando todos los elementos se ordenan.

$$X = [n/2 + 1/2]$$

La moda es el valor que se presenta el mayor número de veces.

#### **4.6.3. Medidas de dispersión**

La más utilizada, entre otras, es la amplitud que corresponde a la diferencia entre el dato mayor y el dato menor.

$$R = X \text{ máx.} - X \text{ mín.}$$

#### **4.6.4. La desviación estándar**

O desviación tipo, se define como la raíz cuadrada de los cuadrados de las desviaciones de los valores de la variable respecto a su media.

#### **4.6.5. La varianza**

Es el cuadrado de la desviación estándar.

#### **4.6.6. Confección de tablas de frecuencias**

Dentro de las frecuencias que aparecen en las tablas, las más comunes son frecuencia absoluta, la frecuencia absoluta acumulada y la frecuencia relativa.

- a) **La frecuencia absoluta  $f(x_i)$ .** Se determina con el número de veces que se repite un dato  $x_i$ .
- b) **La frecuencia absoluta acumulada  $F_i$ .** Para un determinado valor se considera como la frecuencia de cada dato  $x_i$  más la suma de los valores anteriores a dicha suma.
- c) **La frecuencia relativa  $h_i$ .** Es el cociente  $h_i = f_i/N$ . En algunas ocasiones se representa como  $n_i/N$ , donde  $N$  es el número total de datos. Corresponde a la suma de todas las frecuencias individuales de cada clase. Las frecuencias relativas representan el porcentaje de veces en que ocurre un dato. Como veremos en teoría de probabilidades, el concepto de frecuencia relativa nos conduce a un concepto de probabilidad.
- d) **La frecuencia relativa acumulada  $H_i$ .** Es la suma de los valores acumulados de la frecuencia relativa.

#### 4.6.7. Determinación de valores extremos

- a) Cálculo de períodos de retorno.
  - Análisis multivariado.
  - Diagramas de dispersión.
  - Tablas de contingencia.
- b) Reconstrucción y estimación de datos.
  - Correlaciones.
  - Interpolación y extrapolación.
  - Regresiones simples y múltiples.
  - Razón simple, normal y ajustada.

## **4.7. CONCEPTOS DE LA INFORMACIÓN AGROMETEOROLÓGICA**

A continuación se hace una descripción de algunos términos utilizados en este documento.

### **4.7.1. Hora UTC**

Se trata de la Universal Time Cordinated (Tiempo Universal Coordinado) que corresponde a la coordinación de la hora local en cualquier punto de la Tierra, con la hora de Greenwich. Las diferencias pueden ser en sentido de más y de menos según el lugar en relación con el primer meridiano.

Para obtener la diferencia en nuestro país, se utiliza:

Verano:  $\text{HORA LOCAL} + 3 \text{ HORAS} = \text{UTC}$

Invierno:  $\text{HORA LOCAL} + 4 \text{ HORAS} = \text{UTC}$

### **4.7.2. Sequía**

En términos generales es un fenómeno meteorológico de una gran extensión en el tiempo y espacio, con precipitaciones insuficientes en su cantidad y distribución.

### **4.7.3. Sequía agrícola**

Se presenta cuando la cantidad de precipitación, su distribución, las reservas de agua del suelo y las pérdidas debido a la evaporación, se combinan para causar disminuciones considerables en el rendimiento de los cultivos y el ganado.



#### 4.7.4. Sequía meteorológica

Cuando las precipitaciones alcanzan el 60% o menos de lo normal anual, durante dos años consecutivos o más, en el 50% de la extensión espacial de la región. Ausencia prolongada, marcada deficiencia o pobre distribución de la precipitación (OMM).

Para Calcular el déficit y superávit se utiliza:

$$\frac{\text{Total a la Fecha-promedio (Normal) a la fecha}}{\text{Promedio (Normal) a la fecha}} * 100$$

#### 4.7.5. Serie climatológica

Un juego de datos homogéneos compuesto de variables aleatorias discretas o continuas, seleccionado de una sola población, comúnmente infinita en su extensión.

#### 4.7.6. Temperatura media diaria

Media de las temperaturas observadas en 24 intervalos cronológicos iguales, durante 24 horas seguidas; o una combinación de temperaturas observadas con menos frecuencia, ajustadas de modo que difiera lo menos posible del valor de 24 horas.

#### 4.7.7. Temperatura extrema

Temperatura más alta o más baja alcanzada en un intervalo cronológico dado.

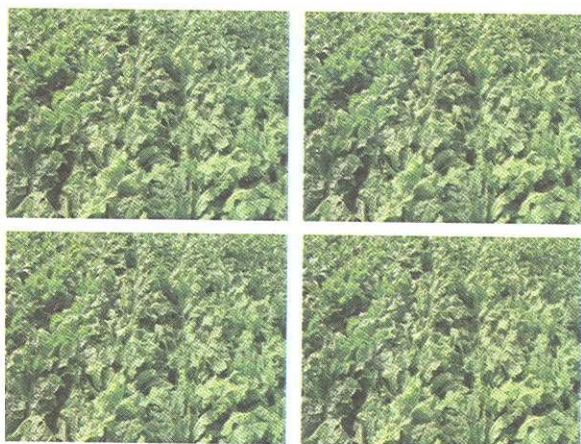
#### **4.7.8. Valor promedio – valor medio**

Media aritmética ( $\bar{x}$ ) de un número ( $n$ ) de observaciones:  $x_1, x_2, \dots, x_n$

#### **4.8. RESUMEN**

- Los conceptos entregados son de uso habitual en la Dirección Meteorológica de Chile.
- Estas estadísticas pueden ser ampliadas de acuerdo a los conocimientos y necesidades de cada uno de los usuarios.
- Los datos generados por las Estaciones Agrometeorológicas pueden ser utilizados por diversas aplicaciones y actividades.
- Los diferentes métodos expuestos son una herramienta muy poderosa para una mejor planificación y aplicación de la agricultura.
- Los datos que se necesitan para meteorología agrícola son, en gran medida, los mismos que se utilizan en meteorología general; pero deben ser complementados con datos del medio ambiente (biosfera) como biológicos.

# Aplicaciones



## CAPÍTULO 5

### **SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE ENFERMEDADES**

*Autor*

**Ricardo C. Moschini.**

Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Instituto de Clima y Agua, CIRN,  
INTA Castelar, cp 17 12, V.  
Udaondo,  
Buenos Aires, Argentina.  
[rmoschini@cni.inta.gov.ar](mailto:rmoschini@cni.inta.gov.ar)

## **5.1. INTRODUCCIÓN**

### **5.1.1. Protección vegetal y el control integrado de plagas y enfermedades**

Las posibles consecuencias por la utilización excesiva de agroquímicos, tales como sus efectos sobre la salud humana y el ambiente, han hecho necesario plantear una agricultura orientada a un uso óptimo, pero no máximo, de la energía y pesticidas (Rabbinge y Rijsdijk, 1983). Primariamente, será beneficioso redoblar los esfuerzos para impulsar sistemas de producción agropecuaria que utilicen los insumos químicos de una manera racional y estratégica. En este marco, la protección vegetal se incorpora al concepto del manejo integrado de plagas y enfermedades (MIP), entre cuyos elementos importantes figuran: la definición de umbrales económicos de daños o niveles de tolerancia, métodos de muestreos en el campo, influencia de los enemigos naturales y esquemas de control químico supervisados por servicios de alarma eficientes y prácticos. El MIP tiene por objetivo reducir las pérdidas de cosechas debidas a plagas insectiles y enfermedades, procurando que los efectos para el medio ambiente sean lo menos perjudiciales y brinden un máximo beneficio económico (Theunissen, 1994).

### **5.1.2. El triángulo y tetraedro de la enfermedad**

Integrando el agroecosistema, las enfermedades representan uno de los factores que inducen pérdidas a los cultivos. En la naturaleza la enfermedad es una función combinada de un patógeno virulento, un hospedante susceptible y un ambiente favorable, con lo que se conforma el comúnmente llamado triángulo de la enfermedad. La intervención humana, al incorporar cultivos con sus prácticas de manejo y control, interacciona con estos componentes, conformando un tetraedro. La epidemia, definida como el incremento temporal y espacial de la enfermedad, depende de los factores interactivos del tetraedro epidémico:

- a) **Hospedante.** Su resistencia a la enfermedad se relaciona con la fase de crecimiento del cultivo y/o con su nivel de resistencia, que demora su aparición (resistencia vertical: gen por gen) o disminuye su tasa de incremento (resistencia horizontal) durante los estados susceptibles del hospedante. Se ha observado un cambio aparente de resistencia con la edad y fase fenológica del cultivo. La distribución regional, densidad de siembra y estado fisiológico general del cultivo, también ejercen influencia sobre el desarrollo epidémico. La acumulación de carbohidratos no translocados en hojas y tallos crea un favorable sustrato para royas en cereales (Bourke, 1970). Brennan (1988) relacionó el mejoramiento de la disponibilidad de fósforo en suelos sembrados con trigo con una reducción en la incidencia de *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (Pietín), como consecuencia del mayor crecimiento radicular estimulado por la fertilización fosforada (escape del cultivo).
- b) **Ambiente.** Entre los factores meteorológicos (destacables dentro del ambiente abiótico), los más gravitantes son la duración del mojado (lluvia, rocío, neblina) del tejido vegetal susceptible y la temperatura, responsables del desencadenamiento de la infección-esporulación y de la velocidad de los procesos involucrados, respectivamente. El viento y la lluvia intervienen en la diseminación de los patógenos (Kranz, 1994). Otras variables ambientales como las condiciones del suelo (pH, fertilidad, temperatura) y factores bióticos pueden también ejercer influencia.
- c) **Patógeno (hongos, bacterias y virus).** Algunos elementos a considerar se refieren a la disponibilidad y cantidad de inóculo, su eficacia (composición de virulencia y agresividad media) y su sobrevivencia de una estación a otra (determina el inóculo primario). Los requerimientos térmicos y de duración del período de mojado del proceso de infección, varían fuertemente entre las diversas especies de patógenos. Los biotróficos infectan durante relativamente cortos períodos de mojado (enfermedades de rocío). Por ejemplo las uredosporas de *Puccinia recondita* pueden infectar las hojas de trigo con 3-4 hs de mojado, bajo óptimas condiciones térmicas (Roelfs, 1986). Los patógenos necrotróficos (ejemplos: *Fusarium graminearum*, *Septoria tritici*) requieren moderados a largos períodos de

mojado (enfermedades de lluvia). En muchas virosis la enfermedad se completa con un necesario transmisor (vector) del virus al hospedante, como el caso de especies de pulgones en la virosis de la papa (PLRV) o *Delphacodes kuscheli* (Homóptera: Delphacidae) en el Mal de Río Cuarto del maíz.

- d) **Hombre.** Impone cultivos y prácticas de manejo cambiantes que impactan sobre las enfermedades. En este sentido, la introducción de la siembra directa (labranza cero), sin quema de rastrojos y el monocultivo han favorecido la supervivencia de patógenos necrotróficos, en comparación a cereales implantados con sistemas de labranza convencional o con rotación de cultivos (Reis, 1990). La aplicación de fertilizantes ácidos, el mejoramiento de drenaje del suelo, la rotación con avena, lino o colza representan medios de control del pietín en trigo (*Gaeumannomyces graminis*). El hombre interviene modificando uno o más componentes del triángulo de la enfermedad, definiendo las bases del control estratégico y táctico de epidemias. La definición de estrategias de control se funda en la disponibilidad de cartografía de las áreas de riesgo respecto a las enfermedades, permitiendo un uso eficiente de los limitados recursos genéticos y económicos (Weltzien, 1982). Habiendo previamente establecido que la ocurrencia de 40 horas consecutivas de agua libre en capítulos de girasol resulta clave para la infección de *Sclerotinia sclerotiorum*, Payen (1983) modelizó este proceso de humectación y delimitó el área girasolera francesa con potencialidad climática en relación a la enfermedad. Entre las prácticas enmarcadas en el control estratégico se señalan: introducción de cultivares resistentes, aislamiento geográfico del patógeno, rotación de cultivos y uso de semilla certificada (Johnson, 1989). La realidad invalida en ciertos casos algunas de estas prácticas, por ello la toma de decisiones en el corto plazo conduce a la necesidad de disponer de los elementos básicos para el control táctico de las enfermedades, el cual comprende el uso de agroquímicos. La satisfacción de esta demanda y razones económicas-ecológicas, han favorecido el desarrollo de sistemas de pronóstico de enfermedades.



## 5.2. SISTEMAS DE PRONÓSTICO DE ENFERMEDADES DE CULTIVOS

### 5.2.1. Caracterización de metodologías de desarrollo

Como soporte al manejo estratégico y táctico de las enfermedades, se construyen sistemas de pronóstico o modelos predictivos de las mismas, fundamentados en factores ligados al hospedante, al patógeno y al ambiente, en forma individual o interaccionando. En la actualidad se disponen modelos matemáticos cuantitativos que abarcan desde simples ecuaciones predictivas de la enfermedad basados en las condiciones meteorológicas hasta complejos sistemas que combinan modelos fonológicos del cultivo con los de la epidemia. Muchos sistemas funcionales de pronóstico, identificando e interpretando las condiciones favorables pasadas y actuales, ayudan al productor agrícola a tomar las mejores decisiones entre alternativas de manejo. Es frecuente la disponibilidad de sistemas predictivos que sustentan el uso de fungicidas de acuerdo a su necesidad, en contraste a los tratamientos de seguridad o rutinarios. Esto ha contribuido a la reducción de costos y a la disminución de los riesgos de impacto ambiental o advenimiento de procesos de insensibilidad de los patógenos al fungicida (Royle y Shaw, 1988). Los modelos predictivos pueden brindar la información básica para desarrollar mapas con la distribución espacial de las enfermedades analizadas. Para mancha en red (*Drechslera teres*) y escaldadura (*Rhynchosporium secalis*) en cebada cervecera, se delimitaron las áreas de riesgo en la región pampeana Argentina, utilizando sendos modelos de predicción de sus incidencias (Moschini *et al.*, 1996; Carmona *et al.*, 1997). También los sistemas de pronóstico de enfermedades pueden usarse para analizar el impacto de la variabilidad climática.

Krause y Massie (1975) reconocieron dos tipos de sistemas de pronóstico: el fundamental o inductivo y el empírico o deductivo. El fundamental utiliza información generada en experimentos de laboratorio, cámara con ambiente controlado, invernáculo o campo para describir la influencia ambiental sobre 1 ó más aspectos de la interacción huésped-patógeno (permiten determinar relaciones causa-efecto). Frecuentemente se evalúa el efecto de la duración de mojado y temperatura sobre 1 ó pocos componentes del ciclo

de la enfermedad (ejemplo: infección), visualizando la relación en tablas y gráficos o ajustando ecuaciones. Duthie (1997) señala que la respuesta al efecto combinado de duración de mojado y temperatura puede describirse por ecuaciones polinómicas de segundo o tercer grado (Schuh, 1991; Filajdic y Sutton, 1992). En algunos casos, se puede transformar la variable respuesta (Grove *et al.*, 1985) o las variables independientes (1 ó más) (Trapero-Casas y Kaiser, 1992) con el objeto de simplificar la relación o normalizar los datos. Las relaciones de dependencia de la temperatura y la duración de mojado establecidas bajo condiciones controladas de laboratorio pueden en muchos casos distorsionarse en el ambiente natural (cambios en la disponibilidad de inóculo, nutrientes, microflora, edad de las hojas, condición fisiológica). Los sistemas de pronóstico empíricos o deductivos, muchos de los cuales son de gran utilidad y funcionales, surgen del análisis de datos actuales e históricos de registros de enfermedad y condiciones ambientales en un sitio dado. Esto resulta en la formulación de reglas que deben cumplirse antes que se produzca el desarrollo de la enfermedad, por ejemplo las establecidas para el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) de la papa por Hyre (1954). Coakley (1988) sugiere que un mínimo de 8-12 años de observaciones de la enfermedad (de lotes de cultivo con inóculo natural) se deben disponer para identificar con certeza los factores climáticos asociados. Si esto no fuera posible, se podría utilizar información meteorológica y de la enfermedad de varios sitios pertenecientes a una región geográfica, de manera de obtener variabilidad.

### 5.2.2. Procedimientos estadísticos usados para su desarrollo

- a) **Análisis de regresión lineal.** Ajusta una ecuación que predice una variable respuesta o dependiente en función de variables regresoras o independientes y parámetros estimados por el método de mínimos cuadrados. El análisis de regresión múltiple, de todas las técnicas de análisis multivariado, es el de más aplicación en el campo de la fitopatología, siendo frecuentemente utilizado para establecer la relación empírica existente entre la enfermedad (dependiente) y variables independientes (en muchos casos meteorológicas). En algunos casos los niveles de incidencia

y/o severidad de la enfermedad son analizados sin transformar utilizando una escala porcentual por cultivar (Eversmeyer *et al.*, 1973; Coakley *et al.*, 1985) o promedios de los porcentajes observados por muchas líneas o variedades (Daamen *et al.*, 1992; Moschini y Fortugno, 1996; McLaren y Flett, 1998). Frecuentemente el nivel de enfermedad se analiza con previa transformación del dato porcentual (arcoseno, raíz cuadrada, logaritmo natural) para estabilizar la varianza (Wilcox y Seen, 1993). La escala 0 a 9 es usada por Coakley *et al.* (1988) como índice de intensidad de ataque de *Puccinia striiformis* en trigo o para expresar la sobrevivencia invernal de inóculo de *Puccinia triticina* (nombre científico actual de *Puccinia recondita*) (Eversmeyer y Kramer, 1998).

Existen estudios (Eversmeyer y Burleigh, 1970; Subba Rao *et al.*, 1990) donde la variable dependiente se expresa como logit de la severidad a lo largo de la epidemia ( $L = \ln(p/1-p)$ ), siendo  $p$  la proporción de la severidad de la roya) o como área bajo la curva de progreso epidémico (Johnson *et al.*, 1986). Kim *et al.*, 1988, definieron un modelo logístico que usa los valores acumulados de unidades de severidad de *Pycularia grisea* (definidos en función de los valores diarios de mojado, humedad relativa y temperatura) como predictor del desarrollo epidémico.

Establecida la fase del cultivo a monitorear, la selección preliminar de los mejores modelos de regresión se realiza utilizando el procedimiento estadístico Rsquare, el cual evalúa todas las posibles ecuaciones de regresión lineal, desde las simples hasta las múltiples, comparando sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ). Previa evaluación de su sentido biológico, en la selección final de un modelo predictivo apropiado, Wilcox y Seen (1993) tuvieron en cuenta la significancia de parámetros y aleatoriedad de los gráficos de residuales. Eversmeyer y Kramer (1998) seleccionó aquellos modelos con el máximo  $R^2$ , menor número de factores independientes y mínima variación promedio entre los valores observados y predichos de la variable dependiente. Coakley *et al.*, (1985) consideraron, como medida del error de predicción de los modelos, el estadístico PRESS (suma de los cuadrados de los errores para predecir alternantes observaciones faltantes mediante modelos definidos con las

n-1 observaciones). Otra técnica de selección usada es la de regresión múltiple Stepwise (Eversmeyer y Burleigh, 1970; Eversmeyer y Kramer, 1998), la cual incorpora a cada paso la variable regresora que logra el mayor ajuste del modelo (variables incluidas en la ecuación pueden removerse en pasos siguientes).

- b) **Modelos lineales generalizados.** Por el método de mínimos cuadrados se ajustan modelos lineales de regresión para predecir la severidad de una enfermedad a partir de variables clasificatorias o discretas (ejemplo: grado de resistencia de los cultivos) y continuas. Las variables meteorológicas pueden evaluarse como componentes de tendencia lineal, además de analizarse su interacción con la componente clasificatoria (Moschini y Pérez, 1999), (Moschini *et al.*, 2002).
- c) **Análisis discriminante.** Permite clasificar a un conjunto de individuos u observaciones (por ejemplo años) en una de varias categorías posibles, sobre la base de un conjunto de variables independientes cuantitativas (supuesto de normalidad multivariada). A veces se incluye el procedimiento de selección Stepwise para encontrar el subconjunto de variables cuantitativas que mejor revele las diferencias entre clases.

Bajo el supuesto de normalidad multivariada de las variables independientes (meteorológicas y una binaria: potencial de inóculo), Johnson *et al.* (1996) definieron dos funciones lineales discriminantes para pronosticar epidemias de tizón tardío de la papa en Estados Unidos. También March *et al.* (1995) utilizaron esta técnica para desarrollar un modelo que predice la ocurrencia de años severos o moderados respecto a la intensidad de la virosis Mal de Río Cuarto del maíz.

- d) **Regresión Logística.** Por el método de máxima verosimilitud y la función logit como nexo, ajustan modelos lineales de regresión que relacionan la probabilidad de la variable respuesta (binaria: 1 y 0: con o sin enfermedad; ordinal: nivel de enfermedad: nulo, moderado, severo) con variables explicativas. El supuesto de normalidad multivariada no es requerido para que la regresión logística sea válida. Johnson *et al.* (1996) y Turechek

y Stevenson (1998) ajustaron de ecuaciones de regresión logística para explicar la probabilidad de observar o no ataque de *Phytophthora infestans* en papa y de *Cladosporium caryigenum* en pecán, respectivamente. De Wolf *et al.* (2002), basándose en datos meteorológicos, desarrollaron modelos de regresión logística para evaluar el riesgo de epidemias de la FET (severidad mayor a 10 %) en tres regiones trigueras de Estados Unidos. En este caso las variables predictoras son procesadas en un lapso de 17 días alrededor de la antesis del cultivo.

- e) **Verificación-Validación.** La verificación involucra la comparación de la estructura y comportamiento general (sentido biológico) del modelo con el sistema real. La validación es la comparación cuantitativa de la salida del modelo con datos epidémicos reales no usados en su desarrollo. El grado de ajuste entre los valores de enfermedad estimados por un modelo versus los observados puede analizarse por métodos estadísticos como el test de “t” de diferencias entre medias (Coakley *et al.*, 1982; Moschini *et al.* 2001) y por el método gráfico. Este último visualiza la dispersión de los puntos que relacionan los valores observados con los estimados, respecto a la línea de ajuste perfecto (1:1).
- f) **Análisis de Sensibilidad.** Verifica la sensibilidad de la salida del modelo a cambios en parámetros y variables predictoras, registrando a cada paso la magnitud de la variación en el valor medio predicho (en porcentaje respecto al mismo valor con el modelo original). También se calcula la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los residuales (diferencias entre los valores observados y predichos), indicando un menor valor en el error, una mayor precisión en las predicciones de los modelos.

### 5.3. CLASIFICACIÓN (Figura 5.1)

#### 5.3.1. Una Enfermedad - Simple

- a) **Basados en el Hospedante.** Kranz (1994) considera que a partir de las fases de crecimiento o de la edad de un cultivo es posible planificar su protección de enfermedades, si previamente se ha establecido la relación entre estados críticos de desarrollo del hospedante con la infección-aparición de patógenos o pérdidas en cultivos. Frecuentemente, con medidas de control siguiendo un criterio fenológico, se logra un número reducido de intervenciones, en comparación al observado con tratamientos reglados por calendario. En ciertos casos, esta predicción basada en la fenología del cultivo, constituye un pronóstico negativo cuando se define, para una cierta fase del hospedante, la nula o escasa probabilidad de aparición de una enfermedad. Los sistemas de pronóstico basados solo en el hospedante son escasos (variaciones dentro-entre ciclos son pequeñas comparadas a las del ambiente y patógeno). Un sistema que refleja el cambio de la receptividad del hospedante con la edad, es el desarrollado contra tizón temprano de la papa (*Alternaria solani*) por Pscheidt y Stevenson (1983).
- b) **Basados en el Patógeno.** La medición directa de la densidad de inóculo es la más simple forma de predecir el nivel de enfermedad. Este enfoque es adoptado en enfermedades monocíclicas, policíclicas de pocas generaciones en la estación de crecimiento o policíclicas donde el inóculo inicial es de importancia cuali-cuantitativa. Dentro de las enfermedades causadas por hongos de suelo, Campbell y Madden (1990) citan los sistemas de recuento de esclerocios para pronosticar las podredumbres causadas por *Sclerotium rolfsii* y *Sclerotium cepivorum*, en remolacha azucarera y cebolla, respectivamente.

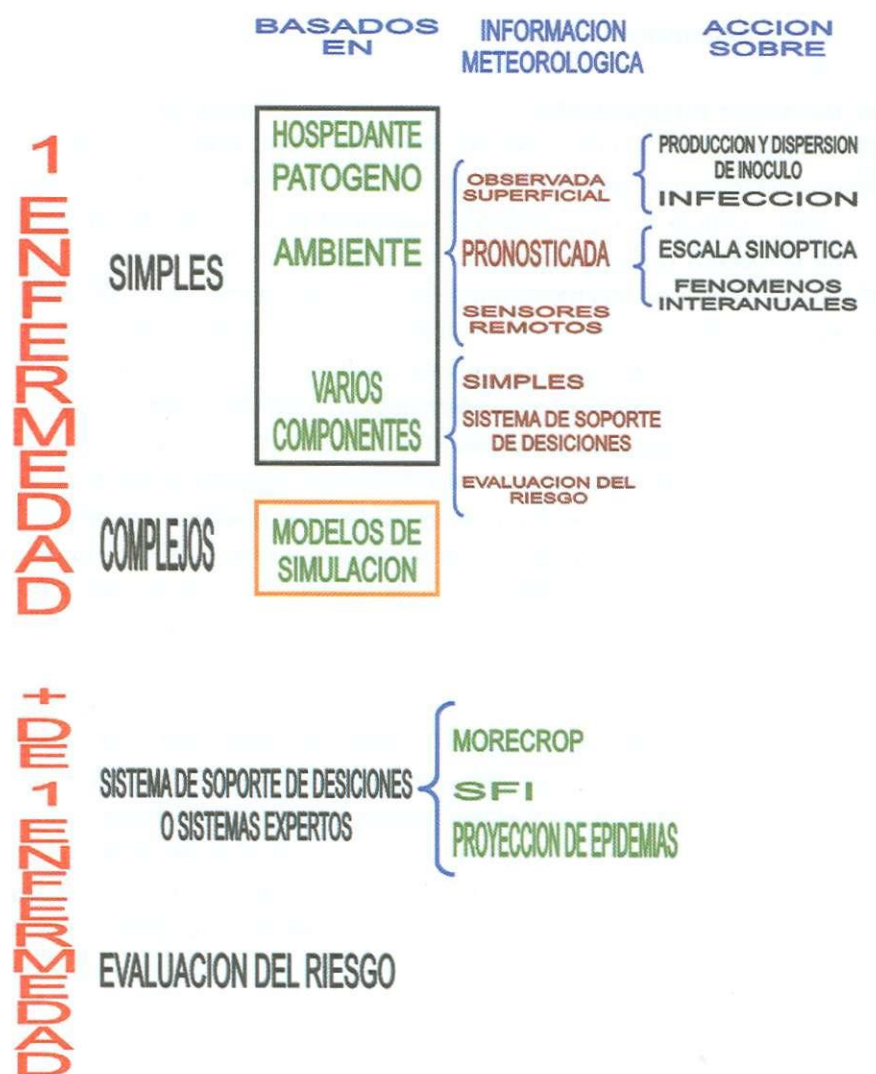


Figura 5.1. Clasificación de sistemas de pronóstico de enfermedades.



Rouse (1985) utiliza este enfoque para pronosticar el marchitamiento producido por *Verticillium dahliae*. Para algunas enfermedades foliares se ha encontrado una relación entre la cantidad de enfermedad y el número de esporas colectadas en trampas (Jeger, 1984).

### c) **Basados en el Ambiente**

#### **Información meteorológica observada superficial**

Con mucha frecuencia las variables meteorológicas consideradas por los pronósticos de enfermedades se basan en observaciones (paso diario a horario) de temperatura, humedad relativa, duración de mojado y precipitación, provenientes de estaciones meteorológicas estándar algo distantes del cultivo o de estaciones que miden las condiciones microclimáticas de la canopia. Entre estas dos alternativas de medición meteorológica, Coakley (1988) señala que el macroclima produce el microclima, estando este último limitado en desarrollar una enfermedad cuando existe un ambiente macroclimático desfavorable. A nivel mundial, valores diarios de temperatura máxima-mínima y de precipitación son rutinariamente registrados en estaciones convencionales, disponiéndose de largas series históricas para muchas localidades. Por el contrario los registros microclimáticos cubren en general cortos períodos de tiempo y pocas localidades, con alta frecuencia de datos faltantes.

#### **Acción sobre producción y dispersión de inóculo**

Se han definido los factores meteorológicos asociados con la esporulación de *Peronospora destructor* (biotrófico) (Hildebrand y Sutton, 1982) y de *Botrytis squamosa* (necrotrófico) en cebolla (Sutton *et al.*, 1983). También se estudió el efecto ambiental (humedad relativa, radiación infrarroja, viento y lluvia) sobre el proceso de dispersión de inóculo. La máxima liberación de esporas de *Pyricularia oryzae* (Leach, 1980z) se asocia a altos niveles de HR en el atardecer o noche. En *Venturia inaequalis* (sarna del manzano), el inóculo inicial (ascosporas), presente en grandes cantidades, es muy importante para determinar el desarrollo epidémico (patógeno policíclico con pocos ciclos secundarios). El hongo pasa el invierno como pseudotecios en hojas sobre el suelo, los cuales descargan

las ascosporas (disponibles 1-2 meses) al mojarse. Las ascosporas son dispersadas entre las 7 y 18 horas durante intervalos de mojado iniciados por lluvias, siendo un criterio útil para el pronóstico del ataque primario de la sarna del manzano en primavera (MacHardy y Gaudory, 1986). Eversmeyer y Kramer (1998) definieron una serie de modelos que pronostican la sobrevivencia invernal del inóculo de *Puccinia triticina* a fines del macollaje en trigo, sobre la base de variables térmicas e hídricas calculadas en lapsos previos a la siembra, a la dormancia invernal del trigo o al fin del macollaje.

### **Acción sobre la infección.**

La mayoría de los sistemas predictivos pronostican la ocurrencia de la expresión de los síntomas de la enfermedad, monitoreando ciertas condiciones ambientales conducentes a la infección del huésped por el patógeno. Los más frecuentes toman en cuenta la acción directa de las condiciones físicas, tales como la temperatura, humedad, duración de follaje mojado, etc, requeridos para el proceso de infección. La duración del mojado de la superficie vegetal (rocío, lluvia, riego, niebla) y la temperatura durante el lapso mojado, definen el período crítico para la infección de un patógeno (Sutton, 1988). El sistema de predicción de la sarna del manzano identifica “períodos de infección” durante los cuales las condiciones ambientales favorecen la inoculación y penetración de *Venturia inaequalis*. Mills (1944) en un formato gráfico estableció la superficie de respuesta del tiempo requerido para la infección por el patógeno combinando variables niveles térmicos y de duración de mojado foliar. Se determinan grados de infección que oscilan desde nulos a severos, incrementando ambos factores (temperatura hasta 22 °C). El hongo *Venturia inaequalis* requiere 1-3 días después de inoculación para colonizar el tejido, por ello es sensible a fungicidas que parcialmente penetran la cutícula (Fry y Fohner, 1985). Basados en la presencia de un ambiente favorable actuando sobre el inóculo secundario (supuesto: suficiente disponibilidad de inóculo inicial), se han desarrollado una serie de modelos predictivos, como el de Coakley *et al.* (1985), que predice la severidad de *Septoria tritici* en trigo 26 días después de espigazón en base al total de días consecutivos sin lluvia entre el 26/3 al 4/5 y días consecutivos totales entre el 4/4 y 3/5

con temperatura mínima  $\leq 7^{\circ}\text{C}$ . Basándose en variables que acumulan temperaturas invernales o primaverales, se definen modelos predictivos de la roya amarilla (*Puccinia striiformis*) para algunos cultivares de trigo, en el NO norteamericano (Coakley et al., 1988). Muchos trabajos se han llevado a cabo para pronosticar la severidad del tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) en base a factores ambientales. En Alemania, usando mediciones de temperatura, humedad relativa y lluvia (Ullrich y Schrodter, 1966) se predice cuando es poco probable la ocurrencia de una epidemia de tizón (pronóstico negativo), estimándose el momento del primer tratamiento fungicida. El sistema BLITECAST (Krause et al., 1975) es una versión computarizada de los modelos de Hyre (1954) y Wallin (Wallin y Waggoner, 1950). El programa pronostica la aparición inicial de tizón tardío 7-14 días después de la primer ocurrencia de 10 días consecutivos favorables de lluvia o tizón (Hyre: día favorable: lluvia total de los 10 días previos:  $\geq 30$  mm, temperatura media de los 5 días previos:  $\leq 25,5^{\circ}\text{C}$ ) o la acumulación de 18 valores de severidad (Wallin asigna valores de severidad de 0 a 4 en base a las horas con registros de humedad relativa  $\geq 90\%$  y la temperatura media durante esas horas). Se inicia el monitoreo a partir de la emergencia del cultivo. La primera pulverización se aconseja con la primera alarma, las subsiguientes son recomendadas de acuerdo a una matriz que correlaciona días favorables de lluvia con valores de severidad durante los últimos 7 días. Actualmente, con microprocesadores instalados dentro de la canopia del cultivo, que registran y procesan información de temperatura, humedad relativa y lluvia, se ofrecen recomendaciones sobre aplicaciones de fungicidas, basados en el BLITECAST (MacKenzie, 1981). El sistema FAST determina la necesidad de aplicar fungicida para controlar al tizón temprano del tomate (*Alternaria solani*) de acuerdo a los valores que observan dos submodelos, basados en la duración y temperatura de períodos de mojado foliar (modelo S) y en la temperatura, humedad relativa y lluvia en los 5-7 días previos (modelo R) (Madden et al., 1978).

### **Acción sobre el vector**

March et al. (1995) relacionan y cuantifican el efecto de variables meteorológicas térmicas e hídricas del trimestre invernal sobre la

intensidad relativa de la virosis Mal de Río Cuarto del maíz. Las condiciones ambientales del invierno, previo a la siembra del maíz, ejercen una directa influencia sobre el desarrollo poblacional del vector (*Delphacodes kuscheli*) e indirecta al afectar el crecimiento de los cultivos de avena y trigo, hospedantes transitorios del vector antes de alimentarse del maíz (primeras semanas desde emergencia).

### **Información meteorológica pronosticada: escala sinóptica y fenómenos interanuales.**

A pesar de acordar que el uso de pronósticos meteorológicos podría mejorar las técnicas predictivas de enfermedades basadas solo en datos observados, son pocos los sistemas que los utilizan para realmente predecir la infección u otro evento epidemiológico (Scarpa y Raniere, 1964). En este sentido, Vincelli y Lorbeer (1988) hallaron que la frecuencia y severidad de períodos de infección potencial de *Botrytis squamosa* en cebolla aumentaba con la mayor probabilidad de registrar precipitaciones (pronóstico a 36 horas). Royer *et al.* (1989) aplican pronósticos individuales para pequeñas áreas (1 km<sup>2</sup>), derivados de una nueva técnica que combina pronósticos meteorológicos en mesoescala con datos topográficos y elevación, para generar avisos de alarma (se adelantan hasta 2 días) contra *Phytophthora infestans* en papa. Bourke (1970) señala el valor potencial de analizar la secuencia de factores meteorológicos que favorecen una enfermedad e identificar los tipos de situaciones meteorológicas recurrentes sobre cartas sinópticas (de superficie y niveles superiores, actuales y pronosticados), complementando el rol ejercido por modelos simples de predicción. Al quedar establecida la relación entre la enfermedad y determinada situación sinóptica, se simplifica el pronóstico de la ocurrencia de las condiciones meteorológicas conducentes. En este sentido este autor observó una fuerte asociación entre el ataque de *Phytophthora infestans* en la costa NO europea, con la frecuencia y duración de flujos de aire marítimo tropical. En el centro-norte de Estados Unidos, Wallin y Riley (1960) identificaron las condiciones meteorológicas favorables al tizón en papa, analizando mapas sinópticos diarios, de 5 días y 30 días (previamente se volcaron los valores de severidad estimados de la enfermedad). Mediante el análisis de cartas sinópticas actuales y pronosticadas, se encontró que la producción

de basidiosporas e infección de pino por *Cronartium fusiforme* está ligada a la circulación de aire tropical marítimo, sobre los estados del golfo de México (Davis and Snow, 1968). En enfermedades como el golpe blanco o fusariosis en espigas de trigo (*Gibberella zeae*), donde infecciones múltiples a lo largo del período receptivo (anteras disponibles: 25-30 días) contribuyen a la severidad total, la decisión de controlar químicamente debe resolverse en plenitud de anthesis (al 7mo-8vo día en lote de cultivo, de acuerdo a Reis, 1987). Una caracterización de la situación sinóptica asociada a ciclos altamente epidémicos resulta útil para pronosticar la incidencia total de esta enfermedad, complementado al monitoreo de las variables meteorológicas predictivas definidas por Moschini y Fortugno (1996), en la primer fase del período sensible.

El mayor interés en desarrollar modelos de enfermedades para la toma de decisión estratégica, ha originado nuevos estudios epidémicos en macroescala (Sherm and Yang, 1998). En una escala temporal interanual, El Niño Oscilación del Sur (ENOS) constituye el más importante fenómeno oceánico-atmosférico que causa variabilidad climática. Walker (1932) descubrió la existencia de una fluctuación interanual irregular que llamó Oscilación del Sur (OS), que involucra cambios en el régimen de lluvia y viento sobre los océanos Pacífico tropical e Indico. Bjerknes (1969) asoció la OS con fluctuaciones en la temperatura de superficie del sector oriental ecuatorial del océano Pacífico. El fenómeno ENOS reconoce una fase neutral y dos fases extremas El Niño (calentamiento superficial del mar en el centro-este del Pacífico ecuatorial y presiones mayores a la media en el Océano Indico y Australia) y La Niña (procesos en sentido contrario al de años El Niño). El fenómeno ENOS afecta sistemas de circulación atmosférica ubicados en sitios remotos del planeta (teleconexiones), originando anomalías térmicas y del régimen de lluvias, entre otros. Entre los estudios que asociaron el fenómeno ENOS con las variaciones interanuales de las enfermedades se cita el realizado por Scherm y Yang (1995) para la roya amarilla en China y Estados Unidos. En Australia se propusieron sistemas de alarma contra la presencia de aflatoxinas en maní (Wright and Hansen, 1997) y ergot (*Claviceps* sp) en sorgo (Meinke y Ryley, 1997), basados en el Índice de Oscilación del Sur (IOS). En tres

sitios de la región pampeana Argentina se analizó la asociación existente entre la incidencia de fusariosis en trigo con el fenómeno ENOS (Moschini *et al.*, 1999).

### **Información meteorológica originada en sensores remotos**

La observación por sensores remotos comprende varios métodos no destructivos para adquirir y analizar propiedades espectrales de la vegetación desde distintas distancias (satélites a plataformas en tierra). La radiación solar, fuente de energía básica recibida por la tierra, es responsable de conducir los procesos de fotosíntesis, evaporación y calentamiento del suelo y aire. Esta radiación solar (longitud de onda: 0,3 a 4 micrones) interacciona con el tejido vegetal pudiendo reflejarse, absorberse o transmitirse. Los pigmentos (caroteno y clorofila) y el agua de la hojas absorben (baja reflectancia) la radiación del sol en las bandas del visible (Vi): 0,4-0,7 micrones (radiación fotosintéticamente activa) y del infrarrojo medio: 1,3-2,5 micrones. Entre 0,7-1,3 micrones (infrarrojo cercano: IRc) domina la reflectancia (relacionada con la densidad foliar) y transmitancia. Esta luz reflejada en regiones específicas del visible, infrarrojo cercano y medio del espectro electromagnético ha probado ser de utilidad para detectar deficiencias nutritivas e infestaciones por enfermedades, malezas e insectos. Índices de vegetación multispectrales derivados de la reflectancia de la canopia vegetal puede usarse para monitorear la respuesta del crecimiento de un cultivo en relación a variables climáticas medidas o predichas (Hatfield y Pinter, 1993).

A continuación se describen una serie de instrumentos para medir radiación:

**Radiómetros espectrales aéreos.** El índice de vegetación de diferencia normalizada ( $NDVI = \frac{IRc - Vi}{IRc + Vi}$ ) relaciona la radiación solar reflejada colectada por los canales de la banda del infrarrojo cercano y del visible (satélites NOAA). Una mayor biomasa verde (Índice de Área Foliar: 3-4) se asocia a máximos valores de NDVI. Grilli y Gorla (1997) produjeron mapas dinámicos con distribución espacial y temporal de la abundancia poblacional de *Delphacodes kuscheli*, vector del virus que produce el

Mal de Río Cuarto del maíz. Estos autores demostraron la existencia de una significativa correlación entre valores del NDVI, calculados desde satélites NOAA11 o NOAA 9 y la abundancia poblacional del insecto 36 días después, permitiendo estos resultados el desarrollo de un sistema de monitoreo y pronóstico de la abundancia del vector.

**Radiómetros multiespectrales terrenos.** Las enfermedades que abarcan grandes áreas de cultivo son difíciles de evaluar y de establecer su relación con las pérdidas de rendimiento en el cultivo. La evaluación convencional de las enfermedades está limitada por su alto requerimiento en personal capacitado y por la observancia de cierta subjetividad en su registro. El uso de radiómetros multiespectrales manualmente operados desde tierra para la detección de las enfermedades y estimación de eventuales pérdidas en cultivos, se ha intensificado en los últimos años. Usando este instrumental, Sharp *et al.* (1985) encontraron que las diferencias en los valores de 4 índices verdes en parcelas de trigo sanas vs. enfermas con roya negra y amarilla se incrementaban progresivamente con la evolución de las enfermedades. Nutter (1989) encontró que la reflectancia en la longitud de onda: 0,8 micrones, explicó el 95 % de la variación en la severidad de *Puccinia arachidis* (roya del maní). Nilsson and Johnson (1996) y Nilsson *et al.* (1998) reportaron correlaciones significativas entre la reflectancia en el infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 micrones) y las infecciones de la enfermedad estriada en cebada y del carbón en anteras de *Silene dioica*. Recientemente Kobayashi *et al.* (2001) observaron un incremento de la reflectancia en las regiones espectrales 0,43 a 0,53, 0,58 a 0,68 y 1,48 a 2 micrones con el aumento del % de espiguillas enfermas (*Pyricularia grisea*) en panojas de arroz (laboratorio y campo) en madurez pastosa. También se hallaron correlaciones con cocientes de reflectancias en el rango visible. Un índice calculado en base al cociente entre la reflectancia en el rojo (0,63-0,69 micrones) con la del infrarrojo medio (2,08-2,35 micrones) correlacionó significativamente con la densidad de rocío (Pinter, 1986). Esto implica que las reflectancias espectrales podrían ser útiles para el monitoreo del mojado foliar, variable incluida en modelos predictivos de enfermedades ligadas al rocío (Nilsson, 1995).

#### d) **Basados en varios componentes del tetraedro de la enfermedad**

**Sistemas simples.** Respecto a los sistemas de predicción de la roya de la hoja (*Puccinia triticina*) en trigo, Eversmeyer y Burleigh (1970) consideraron como variable regresora el nivel de enfermedad presente en momentos del ciclo de cultivo, además de las meteorológicas, mientras que Subba Rao *et al.* (1990) encontraron que más del 90 % de la variación del desarrollo de la roya en Louisiana estuvo explicada por la severidad de la enfermedad 2 semanas previas a la predicción y a los grados día acumulados desde la inoculación. Eversmeyer *et al.* (1973) ajustaron ecuaciones lineales para explicar la variación de la severidad de *Puccinia graminis f. sp. tritici* en trigo en base a variables independientes ligadas al huésped (resistencia de los cultivares y estado de desarrollo), al patógeno (severidad de la enfermedad al momento de la predicción) y a las condiciones meteorológicas. Shaw y Royle (1986) desarrollaron un sistema para decidir la aplicación de fungicida contra *Septoria tritici* en trigo, basado en dos componentes: a) nivel de inóculo inicial medido por el conteo de picnidiosporas (nivel alto: más de 50000 por tallo), con el cultivo en comienzo de encañado (espiga a 1 cm. de nudo de macollaje), b) precipitación: se analiza su capacidad de diseminar las esporas del hongo. Con el cultivo en hoja bandera, un aparato especial (salpicómetro: vara vertical enrollada con papel (20-30 cm.) detector que se colorea al salpicarse con tintura ubicada en la base) evalúa el poder de salpicadura de las gotas de lluvia. Daamen *et al.* (1992) ajustaron una ecuación lineal por la cual la prevalencia anual media en mayo de oídio (*Erysiphe graminis*) en trigo, correlacionó positivamente con dos variables térmicas y negativamente con el grado de resistencia medio de los cultivares sembrados cada año. McLaren y Fleet (1998) definieron un modelo mixto de predicción de la severidad (%) del ergot del sorgo (*Claviceps africana*) basado en variables meteorológicas que accionan sobre la predisposición del huésped (menor temperatura mínima en prefloración lleva a menor polen viable, mayor severidad del ergot) y sobre el proceso de infección del patógeno en floración temprana (temperatura máxima media y humedad relativa máxima media. Para la región semiárida del Estado de Washington (Estados Unidos), se definieron dos funciones discriminantes y dos



modelos de regresión logística para pronosticar la ocurrencia de epidemia de *Phytophthora infestans* en papa utilizando variables cuantitativas ligadas a la frecuencia de lluvia y una binaria (año precedente: con o sin epidemia) que evalúa el potencial de inóculo (Johnson *et al.*, 1996). Turechek y Stevenson (1998) ajustaron una función logística para explicar la probabilidad de infección de *Cladosporium caryigenum* en pecán en función de dos variables ligadas al hospedante (resistencia y edad de las hojas) y factores ambientales (temperatura y duración de mojado foliar). Smith *et al.* (1984) desarrollaron un modelo predictivo de la incidencia de la virosis en papa (PLR) en Maine basado en el inóculo inicial (nivel de incidencia en año precedente) y la acumulación térmica (temperaturas mayores a 21°C) del 1 al 10 de agosto que acciona sobre el crecimiento de la población del vector del virus (especies del pulgón del duraznero).

**Sistemas de soporte de decisiones.** Surgen con el fin de integrar la abundante información disponible sobre la biología y control de enfermedades de los principales cultivos y presentar recomendaciones de manejo en un formato amigable al productor agrícola. Como ejemplo se cita el sistema PhytoPRE (Forrer *et al.*, 1993), modelo que simula la epidemia del tizón tardío en papa, indicando la probabilidad de infección. Se ajusta una curva sigmoidea cuyos parámetros se derivaron de una red de parcelas de papa no tratada (3 años). La simulación de la probabilidad de infección es activada con el primer ataque de tizón registrado (Suiza), adaptando la curva simulada a las diferentes condiciones meteorológicas regionales. Se generan mapas con pronósticos regionales de la epidemia y se aconseja el primer tratamiento con fungicida en base a las probabilidades de infección locales. Los siguientes tratamientos dependen del cultivar, lluvia local, ataques de tizón registrados en la región y fungicidas aplicados previamente.

**Evaluación de riesgo.** Se organiza un sistema de puntuación para calificar la influencia de los factores claves relacionados con la enfermedad y a la respuesta económica del posible control químico de la misma (fecha y densidad de siembra, cultivar, sistema de labranza, rotación de cultivo, nivel de precipitación-humedad relativa-rocío, estrategia de riego, fertilidad del

suelo, disponibilidad de inóculo, potencial de rendimiento). La persona que realiza la evaluación otorga una nota a cada factor incorporado, sobre un rango de valores posibles que van de cero a un máximo (relacionado con la importancia relativa del factor considerado). Las notas parciales son totalizadas y comparadas con un valor umbral para decidir (por ejemplo: aplicación de fungicida). Johnson (1987) describe este sistema para dos enfermedades en leguminosas. La evaluación del riesgo de una infección de *Sclerotinia sclerotiorum* (podredumbre de tallo) en colza (Twengstrom y Sigvald, 1993), estimado durante plena floración, incluye los siguientes factores: años desde el último cultivo oleaginoso e incidencia de la enfermedad, densidad del cultivo, rotación de cultivo, precipitaciones en junio y en las últimas 2 semanas, pronóstico meteorológico, riesgo regional. En este estudio sueco, el punto central en la evaluación resultó la presencia de apotecios de *Sclerotinia* en el propio campo (nivel de inóculo), altamente asociado con la ocurrencia de precipitaciones en las semanas previas a la floración en julio.

### 5.3.2. Una Enfermedad - Complejos

Las epidemias en cultivos pueden ser estudiadas y cuantificadas usando modelos empíricos (tienen un uso más limitado) o modelos mecanísticos, los cuales pueden incrementar el entendimiento de la epidemia y la calidad de la predicción. Entre estos últimos están los modelos de simulación, constituidos por submodelos (en fitopatología) que representan componentes de la cadena de infección (germinación de espora, penetración, colonización y esporulación). La simulación es parte del análisis de sistemas, el cual es un enfoque para investigar las relaciones causa efecto. Los modelos de simulación organizan el conocimiento disponible sobre el patosistema y permiten examinar efectos de manipulaciones del sistema, tal como diferentes estrategias de manejo (Campbell y Madden, 1990). Muchos de los simuladores de enfermedades de cultivos están compuestos de modelos determinísticos (Bruhn y Fry, 1981; Benizri y Progetti, 1992), otros como el del mildew de la vid (Sall, 1980) incorpora modelos estocásticos. En los determinísticos hay una exacta predicción de cada variable, en los

estocásticos un rango de predicciones puede ser generado dependiendo en distribuciones de probabilidad (se necesitan múltiples corridas para obtener salidas medias). El modelo de simulación de Bruhn y Fry (1981) para tizón de la papa (*Phytophthora infestans*), incorpora los efectos de resistencia del cultivar y fungicida, además de los ambientales (temperatura y humedad), en el desarrollo de reglas de decisión para la aplicación de fungicidas. El modelo EPURE, desarrollado por Benizri y Projetti (1992) para la roya de la hoja (*Puccinia triticina*), consta de dos submodelos: trigo (simula su evolución desde siembra a grano pastoso mediante suma de grados día y los sitios potenciales de infección) y hongo (simula el ciclo de la uredospora: contaminación, incubación y esporulación). El modelo utiliza la temperatura y la humedad (estima la duración de mojado) tridiurna como elementos meteorológicos de entrada. Se considera que EPURE, puede contribuir al mejoramiento de las alarmas contra esta enfermedad, a la interpretación de resultados en experimentación con fungicidas y al uso racional de estos últimos. El modelo de simulación desarrollado por Yang *et al.* (1991) para evaluar epidemias de la roya de la soja causado por *Phakopsora pachyrhizi* incluye ecuaciones que describen el efecto ambiental sobre componentes de la enfermedad. La tasa de infección fue bien predicha usando horas de mojado y temperatura, posterior a la inoculación. Un modelo exponencial que usa días fisiológicos como variable independiente explica el 98% de la variación del período latente y senescencia de las lesiones. Rossi *et al.*, elaboraron un modelo dinámico de simulación del riesgo de la fusariosis de la espiga de trigo (*Gibberella zeae* y otras especies). El modelo calcula un riesgo de infección diario basado en la esporulación y dispersión de esporas (en función de la temperatura, precipitación y humedad relativa) y en la tasa de infección (afectada por la temperatura, mojado y estado de crecimiento del huésped).

### 5.3.3. Otras enfermedades

#### Sistemas de soporte de decisiones o sistemas expertos.

**MoreCrop.** Sistema experto computarizado diseñado para proveer opciones de manejo de royas (amarilla y de la hoja) y otras enfermedades del trigo

en diferentes zonas agronómicas de la región Nor oeste (NO) de Estados Unidos (Line y Cu, 1993). En primer lugar se establecen las variables del programa y se define un escenario de manejo del cultivo (región, agrozona, rotación de cultivos, riego, fecha de siembra, tipo de labranza, cultivar). Se reconocen 7 regiones de cultivo de trigo con ocurrencia de la roya amarilla, basado en barreras geográficas, vientos predominantes, métodos de cultivo y virulencia de razas. Las zonas agronómicas resultan de combinar 3 criterios: precipitación, grados día acumulados y profundidad de suelo. Las condiciones climáticas en cada zona son definidas en base al análisis de series históricas de 30 años de temperatura (frío, fresco, templado, cálido) y precipitación (nieve, húmedo y seco) que ocurren en el otoño temprano y tardío, invierno y en la primavera temprana y tardía. Si las condiciones meteorológicas estacionales se desvían de la normal climática, se puede cambiar a la situación actual. La fertilidad del suelo es usada como variable si está disponible. Al correr el programa se remarcan las enfermedades con alta probabilidad de ocurrencia, con un factor de confianza que asocia los factores predisponentes. Otros factores usados por MoreCrop para guiar el manejo de las enfermedades son: virulencia de razas y susceptibilidad del hospedante, tipo y grado de resistencia, severidad en distintos estadios de crecimiento del cultivo, pérdidas de rinde en relación a severidad enfermedad, efectividad de fungicidas, potencial de rinde, costo vs beneficio de control.

**SFI.** El Sistema Fitosanitario Integrado desarrollado para 6 enfermedades de trigo en Baviera (Verreet, 1995), se basa en la disponibilidad de un diagnóstico exacto (cualitativo-cuantitativo) de la enfermedad, umbrales de control fundados científicamente y fungicidas de alta eficacia. Sobre la base de muchos ensayos puntuales de campo, se elaboró un valor umbral de control, específico de cada patógeno, en función de las prácticas de manejo del cultivo y de las condiciones ambientales durante el período vegetativo. Si se sobrepasan los valores límite de intensidad de una enfermedad, fijados por los umbrales de control, se producen pérdidas económicas a corto o a largo plazo, señalando el momento óptimo para el uso del fungicida.

**Proyección de epidemias.** Descansa en el monitoreo de la enfermedad en el lote de cultivo, a partir del cual se puede proyectar el futuro nivel de severidad. Las enfermedades policíclicas, de monitoreo visual, con lenta tasa de incremento (al menos inicialmente) y con intensidad menor al umbral de daño económico al ser observables, son las que mejor se adaptan a este enfoque. Para algunas enfermedades, como el tizón de la papa, el monitoreo visual es difícil debido a los períodos de latencia (lapso posterior a la infección pero previo a la expresión de síntomas) y por presentar umbrales de control muy bajos que están muy cerca del nivel de percepción (Johnson, 1987). Como ejemplo de sistema de proyección se cita al EPIPRE (Epidemiology, Prediction and Prevention) (Zadoks, 1989), desarrollado en Holanda con el fin de promover una protección del cultivo de trigo eficiente en costos. El sistema computarizado da recomendaciones para 6 enfermedades y varias especies de pulgones. Cada productor agrícola que entra al sistema realiza su propio monitoreo sanitario del cultivo e inmediatamente envía esta información a una central donde se proyecta el nivel de enfermedad, en base a una ecuación de crecimiento exponencial ( $E_t = E_o \cdot e^{r \cdot t}$ , con  $E$ : nivel de enfermedad al tiempo  $t$ ,  $E_o$ : enfermedad actual obtenido de la observación a campo,  $r$ : tasa de crecimiento relativo de la enfermedad en el tiempo pronosticado). Para el caso de roya amarilla se tabulan los valores de  $r$  en función del estadio fenológico (se inicia con hoja bandera visible) y la fertilización nitrogenada. El valor de  $r$  esperado usado en la ecuación exponencial resulta de multiplicar  $r$  por un coeficiente de compatibilidad (depende de la resistencia varietal) y por un factor asociado a las condiciones culturales. Además se aplican factores de reducción por tipo de agroquímico usado (sistémico o de contacto). El nivel de enfermedad esperado ( $E_t$ ) es multiplicado por un factor (varía con estadio fenológico y potencial de rinde del trigo) para obtener la merma de rinde estimada (kg/ha), la cual balanceada con el costo produce la recomendación final de aplicar o no un fungicida.

**Evaluación de Riesgos.** Reis *et al.* (1999) establecieron un sistema de acumulación de puntos en cada situación del cultivo de trigo que permite estimar su potencial de rendimiento, el cual sustenta la toma

de decisión respecto al uso de fungicidas en los órganos aéreos del trigo (con sustentabilidad económica y ecológica). El sistema, ajustado en dos estados del SE de Brasil, da puntaje a los siguientes factores de rendimiento: disponibilidad de fósforo en suelo, fertilizante nitrogenado aplicado, cultivo previo estival: soja o maíz, años de monocultura o rotación de cultivos en planteos de siembra directa, plantas logradas por metro cuadrado, potencial de rinde del trigo (semana previa al uso del fungicida), comportamiento de la variedad de trigo sembrada respecto a la roya de la hoja (*Puccinia triticina*), incidencia de: oídio (*Blumeria graminis*) y roya de la hoja, de final de macollaje en adelante, y manchas foliares (*Septoria* sp, *Drechslera tritici repentis*) desde encañazón. Con incidencias similares a las establecidas por el umbral de acción (derivadas del umbral de daño económico según Munford y Norton, 1984), se da el puntaje máximo para este factor.

## 5.4. LITERATURA CITADA

Benizri E. y Progetti F. 1992. Mise au point d'un modèle de simulation de la rouille brune du blé. *Agronomie* (1992) 12, 97-104.

Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.* 97: 163-72.

Bourke. P.M.A. 1970. Use of weather information in the prediction of plant disease epiphytotics. In *Plant disease prediction from weather data*. 345-370.

Brennan R.F. 1988. Effect of Phosphorus deficiency in wheat on the infection of roots by *Gaeumannomyces graminis* var. *Tritici*. *Aust. J. Agric. Res.*, 1988, 39, 541-6.

Bruhn J.A. and Fry W.E. 1981. Analysis of potato late blight epidemiology by simulation modelling. *Phytopathology* 71:612-616.

Butt D. and Royle D. 1974. Multiple regression analysis in the epidemiology of plant diseases. *Ecological studies*.

Carmona M.A., Moschini R.C. and Conti H. A. 1997. Meteorological factors influencing the incidence of barley scald and its spatial distribution over the Argentine pampas region. *Journal of Plant Pathology* (1997), 79 (3), 203-209.

Campbell C.L. and Madden L.V. 1990. *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. John Willes & Sons, NY, 532 pp.

Coakley S M, Boyd W.S. and Line R. F. 1982. Statistical models for predicting stripe rust on winter wheat in the Pacific Northwest. *Phytopathology* 72: 1539-1542.

Coakley S. M., Mc Daniel, L. R and Shaner, G. 1985. Model for predicting severity of *Septoria tritici* blotch on winter Wheat. *Phytopathology* 75:1245-1251.

Coakley S. M., Line R.F., Mc Daniel L. R. 1988. Predicting stripe rust severity on winter wheat using an improved method for analyzing meteorological and rust data. *Phytopathology* 78:543-550.

Coakley S. M. 1988. Variation in climate and prediction of disease in plants. *Ann. Rev. Phytopathol.* 26: 163-81.

Daamen R. A, Stubbs R.W. and Stol W. 1992. Surveys of cereal diseases and pests in the Netherlands. Occurrence of powdery mildew and rusts in winter wheat. *Neth. J. Pl. Path.* 98: 301- 312.

Davis R.T., Snow G.A., 1968. Weather systems related to fusiform rust infection. *Plant Disease Repr* 52: 419-422.

De Wolf, E.D., Madden, L.V. and Lipps, P.E. 2002. Risk assessment models for wheat fusarium head blight epidemics based in within-season weather data. *Phytopathology* 93:428-435.

Duthie J.A. 1997. Models of the response of foliar parasites to the combined effects of temperature and duration of wetness. *Phytopathology* 87: 1088-1095.

Eversmeyer M. G. and Burleigh J. R. 1970. A method of predicting epidemic development of wheat leaf rust. *Phytopathology* 60:805-811.

Eversmeyer M. G., Burleigh J. R., Roelfs. 1973. Equations for predicting wheat stem rust development. *Phytopathology* 63:348-351.

Eversmeyer M.G. and Kramer C.L., 1998. Models of early spring survival of wheat leaf rust in the central Great Plains. *Plant Dis.* 82:987-991.

Filajdic N. and Sutton J.C. 1992. Influence of temperature and wetness duration on infection of apple leaves and virulence of different isolates of *Alternaria mali*. *Phytopathology* 82:1279-1283.

Forrer H.R., Gujer H.U., and Fried P.M. 1993. PhytoPRE-A comprehensive information and decision support system for late blight in potatoes. SP-Report, Danish Inst. Plant and Soil Sci., 7, 173-181. From Workshop on Computer-based Decision Support System (DSS) in Crop Production. Parma, Italy, November 23-26 1993.

Fry W.E. and Fohner G.R. 1985. Construction of predictive models: Forecasting disease development. *Advance in Plant Pathology*, Vol 3: Mathematical Modelling of Crop Disease. (C.A. Gilligan, ed) Academic, NY, pp 161-178.

Grilli M.P. and Gorla D.E. 1997. The spatio-temporal pattern of *Delphacodes kuscheli* (Homoptera: Delphacidae) abundance in central Argentina. *Bulletin of Entomological Research* 87, 45-53.

Grove G.G., Madden L.V., Ellis M.A., and Schmitthenner A.F. 1985. Influence of temperature and wetness duration on infection of immature strawberry fruit by *Phytophthora cactorum*. *Phytopathology* 75: 165-169.

Hatfield J.L. and Pinter P.J.Jr. 1993. Remote sensing for crop protection. *Crop Prot.* 12: 403-413.

Hildebrand P. D and Sutton J.C. 1982. Weather variables in relation to an epidemic of onion downy mildew. *Phytopathology* 72:219-224.

Hyre R.A. 1954. Progress in forecasting late blight of potato and tomato. *Plant Disease Reporter*. 38:245-253.

Jeger M.J. 1984. Relating disease progress to cumulative numbers of trapped spores: Apple powdery mildew and scab epidemics in sprayed and unsprayed orchards. *Plant Path.* 33:517-523.

Johnson C.S., Phipps P.M., Beute M.K. 1986. *Cercospora* leaf spot management decisions: uses of a correlation between rainfall and disease severity to evaluate the Virginia leaf spot advisory. *Phytopathology* 76: 860-863.



Johnson, K.B. 1987. The role of predictive systems in disease management. In Crop Loss Assessment and Pest management. Edited by Teng, P. S.

Johnson, K.B. 1989. Crop disease management models: current status and future needs. In proceedings Climate and Agriculture. Systems approaches to decision making.

Johnson D.A., Alldredge J.R. and Vakoch D.L. 1996. Potato late blight forecasting models for the semiarid environment of south-central Washington. *Phytopathology* 86:480-484.

Kim Choong-Hoe, MacKenzie D.R. and Rush M.C. 1988. Field testing a computerized forecasting system for blast disease. *Phytopathology* 78:931-934.

Kobayashi T., Kanda E., Kitada K., Ishiguro K., and Torigoe Y. 2001. Detection of rice panicle blast with multispectral radiometer and the potential of using airborne multispectral scanners. *Phytopathology* 91:316-323.

Kranz, J. 1994. Vigilancia y pronósticos en la protección vegetal. Material informativo para un curso. ZEL. Compiladores: Kranz J., Theunissen J. y Becker-Raterink S.

Krause R. A. and Massie L.B. 1975. Predictive systems: Modern approaches to disease control. *Annu. Rev. Phytopathol.* 13: 31-47.

Krause R. A. , Massie L.B and Hyre R.A. 1975. BLITECAST, a computerized forecast of potato late blight. *Plant Disease Reporter* 59:95-98.

Line R.F. and Cu R.M. 1993. MoreCrop. Managerial options for reasonable economical control of rusts and other pathogens. An expert system for managing wheat diseases in the Pacific Northwest. USDA. Version 1.3.

Leach, C. M 1980. Influence of humidity, red infra red radiation and vibration on spore discharge by *Pyricularia oryzae* *Phytopathology* 70: 201-205.

Madden, L., Pennypacker, S., MacNab, A. 1978. Fast, a forecast system for *Alternaria solani* on tomato. *Plant Dis.* 68

MacHardy W.E. and Gadoury D.M. 1986. Patterns of ascospore discharge by *Venturia inaequalis*. *Phytopathology* 76: 985-990.

MacKenzie, D. 1981. Scheduling fungicide applications for potato late blight with Blitecast. *Plant Disease* 65.

March G.J., Balzarini M., Ornaghi J.A., Beviacqua J.E. and Marinelli A. 1995. Predictive model for "Mal del Río Cuarto" disease intensity. *Plant Dis.* 79: 1051-1053.

McLaren N.W. and Flett B.C., 1998. Use of weather variables to quantify sorghum ergot potential in South Africa. *Plant Dis.* 82:26-29.

Meinke, H. and Ryley, M. 1997. Effects of sorghum ergot on grain sorghum production: a preliminary climatic analysis. *Aust. J. Agr. Res.* 48 (en prensa).

Mills, W. D. 1944. Efficient use of sulfur dusts and sprays during rain to control apple scab. *N Y Agric. Etn. Ithaca Bull.* 630.

Moschini R.C., Fortugno C. 1996. Predicting wheat head blight incidence using models based on meteorological factors in Pergamino, Argentina. *European Journal of Plant Pathology* 102: 211-218.

Moschini R.C., Carmona M., Barreto D. y Conti H. A..1996. Modelos de predicción de la incidencia de la mancha en red en cebada cervecera basados en variables meteorológicas: evaluación del potencial climático de la región pampeana respecto a la enfermedad. *Fitop. Bras.* 21 (3).

Moschini R.C.; Carmona M.; Grondona M. 1999. Wheat head blight incidence variations in the Argentinian pampeana region associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Actas Simposio en Israel Julio 1999.*

Moschini R.C. and Pérez B.A. 1999. Predicting wheat leaf rust severity using planting date, genetic resistance, and weather variables. *Plant Disease* 83:381-384.

Moschini R.C., Pioli R., Carmona M. and Sacchi O. Empirical predictions of wheat head blight in the northern Argentinean Pampas region. *Crop Sci.*: 41: 1541-1545 (2001).

Moschini R.C., Escande A.R, Pereyra V.R, Pedraza V., Quiroz F., Troglia C., Iriarte L. 2002. Predicción de la incidencia de la podredumbre blanda del capítulo de girasol en base a factores ambientales y genéticos. *Rev. Arg. de Arometeorología*, 2(1):51-57, 2002.

Munford J.D. and Norton G.A. 1984. Economics of decision making in pest management. *Ann. Rev. Entomol.* 29:157-174.

Nilsson H.E. 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology. Annual Rev. Phytopathol. 1995, 15: 489-527.

Nilsson H.E, Elmqvist T., and Carlsson U. 1994. Use of near-infrared reflectance spectrometry and multivariate data analysis to detect anther smut disease (*Microbotryum violaceum*) in *Silene dioica*. Phytopathology 84: 764-770.

Nilsson H.E and Johnsson L. 1996. Hand-held radiometry of barley infected by barley stripe in a field experiment. J.Plant Dis. Prot. 103:517-526.

Nutter F.W. Jr. 1989. Detection and measurement of plant disease gradients in peanut with a multispectral radiometer. Phytopathology 79: 958-963.

Payen, D. 1983 Modelisation de l' epidemiologie de *Sclerotinia sclerotiorum* sur tournesol. EPPO Bull 13 (2):277-281.

Pinter P. J. Jr. 1986 Effect of dew on canopy reflectance and temperature. Remote Sens. Environ. 19: 187-205.

Pscheidt J.W., Stevenson W.R. 1983. Forecasting and control of potato early blight, caused by *Alternaria solani*, in Wisconsin. (Abstract). Phytopathology 73:804.

Rabbinge, R. and Rijdsdijk, F. 1983. EIPRE: a disease and pest management system for winter wheat, taking account of micrometeorological factors. EPPO Bull (13-2).

Reis E. M. 1987. Biología y epidemiología de *Gibberella zeae* en trigo. In M M Kohli (ed). Taller sobre la fusariosis de la espiga en América del Sur, CIMMYT, México, D.F., 144 pp.

Reis E. M. 1990. Control of diseases of small grains by rotation and management of crop residues, in southern Brazil. Pages 140-146. In Proceeding of the International Workshop on Conservation Tillage Systems. Passo Fundo. Brazil.

Reis E.M., Carmona M.A. Moschini R.C. 1999. Sistema de avaliao do potencial de rendimento de lavouras de trigo com vistas a tomada de decisao para a aplicacao de fungicidas para o controle economico de doenças foliares. Universidade de Passo Fundo. Brasil. 28 pp.

Sharp E.L., Perry C.R., Scharen G.O., Boatwright D.C., Sands D.C., Lautenschlager L.F., Yahyaoui C.M. and Ravet F.W. 1985. Monitoring cereal rust development with a spectral radiometer. *Phytopathology* 75:936-939.

Roelfs, A.P., 1986. Development and impact of regional cereal rust epidemics. Pages 129-150 in: *Plant Disease Epidemiology Population Dynamics and Management*. Volume I.K.J. Leonard and W.E. Fry, eds Macmillan Publishing Co., N.Y.

Rossi V., Giosue S., Patteri E., Spanna F. and Del Vecchio A. 2003. A model estimating the risk of *Fusarium* head blight on wheat. *OEPP/EPPO Bulletin* 33, 421-425.

Rouse D.I. 1985. Some approaches to prediction of potato early dying disease. *Am. Pot. J.* 62: 187-193.

Royer M.H., Russo J.M., Kelley J.G.W. 1989. Plant disease prediction using a mesoscale weather forecasting technique. *Plant Disease* 73:618-624.

Sall M.A. 1980. Epidemiology of grape powdery mildew: A model. *Phytopathology* 70:338-342.

Scarpa M.J., Raniere L.C., 1964. The use of consecutive hourly dew-points in forecasting downy mildew of lima bean. *Plant Disease Reprt.* 48: 77-81.

Scherm, H. and Yang, X.B.1995. Interannual variations in wheat rust development in China and the United States in relation to the El Niño/Southern Oscillation. *Phytopathology* 85: 970-976.

Scherm, H. and Yang, X.B.1998. Atmospheric teleconnection patterns associated with wheat stripe rust disease in North China. *Int. J. Biometeorol.* 42:28-33.

Schuh W. 1991. Influence of temperature and leaf wetness period on conidial germination in vitro and infection of *Cercospora kikuchii* on soybean. *Phytopathology* 81: 1315-1318.

Shaw M. W. and Royle D.J. 1986. Saving Septoria sprays: the use of disease forecasts. *Proc. Brit. Crop Protect. Conf.*, 1193-1200.

Smith O.P., Storch R.H., Hepler P.R., 1984. Prediction of potato leafroll virus disease in Maine from thermal unit accumulation and an estimate of primary inoculum. *Plant Disease* Vol 68 N°10 863-865.

Subba Rao K.V., Berggren G.T., Snow J.P. 1990. Characterization of wheat leaf rust epidemics in Louisiana. *Phytopathology* 80:402-410.

Sutton J.C. 1988. Predictive value of weather variables in the epidemiology and management of foliar diseases. *Fitopatol. bras.* 12 (4). Dezembro 1988.

Theunissen, J. 1994. Vigilancia y pronósticos en la protección vegetal. Material informativo para un curso. ZEL. Compiladores: Kranz J., Theunissen J. y Becker-Raterink S.

Trapero-Casas A. and Kaiser W. J. 1992. Influence of temperature, wetness period, plant age, and inoculum concentration on infection and development of *Ascochyta* blight of chickpea. *Phytopathology* 82:589-596.

Turechek W.W. and Stevenson K.L. 1998. Effects of host resistance, temperature, leaf wetness duration and leaf age on infection and lesion development of pecan scab. *Phytopathology* 88:1294-1301.

Twengstrom E. and Sigvald R. 1993. Forecasting *Sclerotinia* stem rot using meteorological and field specific data. SP-Report, Danish Inst. Plant and Soil Sci. 7, 211-216. From Workshop on Computer-based Decision Support System (DSS) in Crop Production. Parma, Italy, november 23-26 1993.

Verreet, J. A. 1995. Principles of integrated Pest Management. The IPM wheat model. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer* 48/1995, 1.

Vincelli P.C., Lorbeer J.W. 1988. Relationship of precipitation probability to infection potential of *Botrytis squamosa* on onion. *Phytopathology* 78: 1078-1082.

Walker, G.T. and Bliss E.W. 1932. World weather V. *Mem Royal Meteorolog Soc.* 4:53-84.

Wallin J.R. and Waggoner P.E. 1950. The influence of climate on the development and spread of *Phytophthora infestans* in artificially inoculated potato plots. *Plant Disease Reporter Suppl.* 190:19-33.

Wallin J.R. and Riley J.A., 1960. Weather map analysis –an aid in forecasting potato late blight. *Plant disease Repr.* 44:227-234.

Weltzien, H. 1982. Climatic zoning and plant disease potential. Examples from the Near and Middle East. *Symposium OEPP/OMM*.

Wilcox W.F. and Seen R.C., 1994. Relationship between strawberry gray mold incidence, environmental variables and fungicide applications during different periods of the fruiting season. *Phytopathology* 84:264-270.

Wright, G. and Hansen B. 1997. Climatic effects on aflatoxin incidence and management in Peanut. 2nd Australian Peanut Conference. *Handbook and Proceedings*. July 1997.

Yang, X.B., Dowler, W.M., and Royer, M.H. 1991. Assessing the risk and potential impact of an exotic plant disease. *Plant Dis.* 75: 976-982.

Zadoks, J. C. 1989. EIPRE, a computer-based Decision Support System for pest and disease control in wheat: its development and implementation in Europe. *Plant Disease Epidemiology*, Vol. 2: Genetics, Resistance, and Management. (K.J. Leonard and W.E.Fry, eds.). MacGraw-Hill, Inc., pp 3-29.

## CAPÍTULO 6

### **ALERTA TEMPRANA DE LA SARNA DEL MANZANO (*Venturia inaequalis*) EN LA ZONA DE LOS ÁNGELES, VIII REGIÓN DE CHILE**

#### *Autores*

#### **Ricardo Madariaga B.**

Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
INIA Quilamapu.  
Chillán, Chile.  
rmadaria@inia.cl

#### **Lorena Figueroa M.**

Licenciada en Agronomía  
INIA Quilamapu.  
Chillán, Chile.

#### **Claudio Moore S.**

Servicio Agrícola y Ganadero.

La Sarna del Manzano, causada por el hongo ascomicete *Venturia inaequalis*, constituye la mayor limitante fitosanitaria para este frutal, especialmente cuando se tiene como destino la exportación. La enfermedad se encuentra íntimamente asociada a las condiciones climáticas de temperatura y lluvia, siendo la literatura internacional muy abundante en los temas que asocian el desarrollo de la enfermedad con clima. Por otro lado, en la zona de Los Ángeles, Chile, un grupo cada vez más numeroso de productores han cambiado sus explotaciones de cultivos tradicionales remolacha – trigo, por frutales, entre ellos manzano, pero los problemas fitosanitarios les han causado serias pérdidas. Esta situación motivó que se propusieran estudios que pretenden compilar información meteorológica y relacionarla con aspectos fitosanitarios, lo que a futuro permitiría contar con un sistema de alerta temprana para detectar y controlar enfermedades, en particular la sarna.

Investigaciones en el extranjero han logrado desarrollar modelos que utilizan grados día y pluviometría, identificando los periodos de maduración de ascosporas, que corresponden al inóculo primario *Venturia inaequalis*, entregando esta información a los agricultores para que tomen medidas preventivas. Si en este periodo se logra disminuir la presión del inóculo, se contribuirá a la disminución del inóculo secundario que corresponde a las conidias de la fase asexual del hongo, que en esta etapa corresponde a *Spilocaea pomi*. Asimismo, se podrá disminuir el número de aplicaciones de fungicidas, práctica que aumenta el costo de producción de manzanas, inversión que debe ser realizada actualmente, debido a que la calidad de la fruta disminuye y es rechazada para exportación.

Se espera que con los datos recopilados en esta investigación y con información de futuros ensayos, se logre obtener un modelo epidemiológico de *Venturia inaequalis* para la zona de Los Ángeles y, si es posible, con evaluaciones realizadas en otras localidades del país, obtener aplicar el modelo a otras zonas epidemiológicas en Chile.

Los estudios tuvieron como objetivo desarrollar y/o validar sistemas biológicos que permitan detectar en forma temprana la presencia de *Venturia inaequalis*,



hongo patógeno causante de la Sarna del Manzano, y con ellos racionalizar las aplicaciones de productos químicos.

## 6.1. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en Los Ángeles, VIII Región, en el sector Camino El Peral, en un huerto de manzano ubicado en el fundo “La Finca”. Se estableció en un huerto plantado en el año 1995 con las variedades Fuji y Gala, ubicadas en pares de hileras alternadas (Figura 6.1).

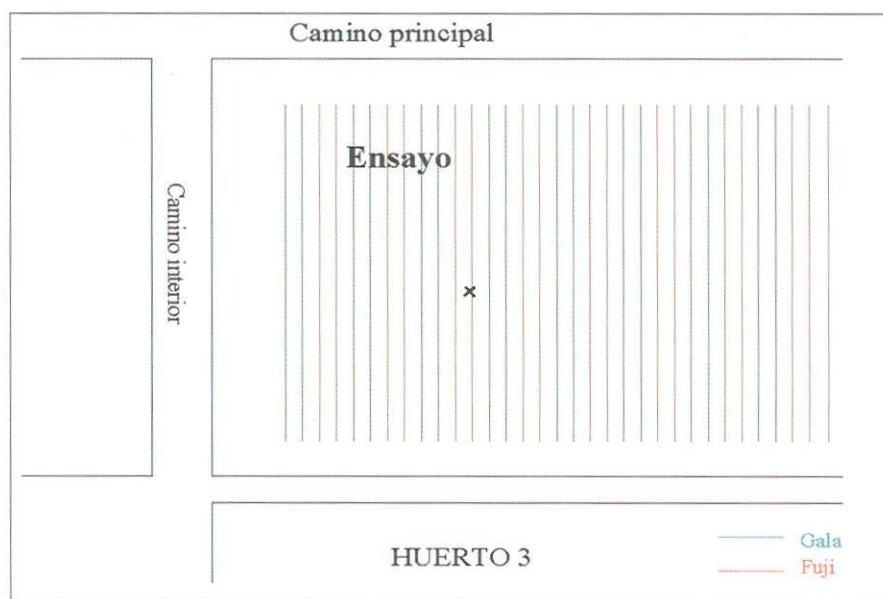


Figura 6.1. Ubicación en el huerto del capturador de esporas en el Predio La Finca.

### 6.1.1. Evaluaciones

#### a) Captura y recuento de ascosporas de *V. inaequalis* en laboratorio.

El proyecto consideró, como elemento básico para la toma de decisiones, la construcción de las curvas de descarga de ascosporas del hongo, agente causal de la sarna del manzano. Para ello en el huerto se instaló, el 15 de

octubre de 2003, el equipo BURKARD 7-day recording volumetric spore trap (Burkard Manufacturing Co Ltd., Rickmansworth, Hertfordshire WD3 IPJ) (Foto 6.1), que está capacitado para tomar automáticamente muestras durante siete días continuos. Para atrapar las esporas cuenta con un orificio de 2 mm x 14 mm por el cual ingresa aire, a una razón de 10 litros/minuto, el que llega a una cinta con un pegamento especial sugerido por Burkard (155 ml agua, 5 g gelatina, 40 g glicerina, 4 g fenol), que atrapa las esporas y otras partículas que se encuentren en el aire (polvo, restos de tejidos vegetales, restos de insectos, propágulos de diversos hongos, etc.). La cinta avanza a una velocidad de 2 mm/h, demorándose siete días en realizar el giro completo, momento en que la cinta debe ser reemplazada. El avance de la cinta de 2 mm/h, permite conocer el número de ascosporas atrapadas en una hora determinada del día.

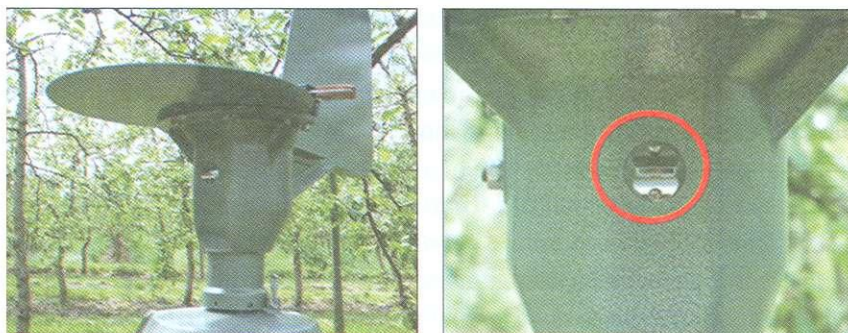


Foto 6.1. Equipo capturador de esporas instalado en el huerto de manzanos y abertura de ingreso del aire contaminado.

En forma semanal se retiró la cinta del equipo capturador de esporas, la que fue examinada en el Laboratorio de Fitopatología del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA Quilamapu). Se utilizó tinción de lactofenol más azul de tripán que permitió discriminar los propágulos de *Venturia inaequalis* de otros contaminantes en el microscopio (200X).

La revisión de la cinta y recuento de ascosporas se realizó a partir del 15 de octubre de 2003, momento en que se estableció el equipo capturador de ascosporas, hasta el 28 de marzo de 2005.

Para determinar la fecha de madurez de los pseudotecios, se colectó hojas de la temporada anterior (2003-2004) que todavía quedaban en el suelo, lo que permitió disponer de ascosporas maduras como referencia. Asimismo, se logró obtener cultivos monoascopóricos para estudios básicos del hongo.

**b) Datos meteorológicos**

Los datos obtenidos del recuento de ascosporas que se liberan diariamente, se relacionaron con la información meteorológica, temperatura y pluviometría, que fue registrada cada 1 hora por la estación meteorológica automática ubicada en el huerto. Además, en forma complementaria, se utilizó información de la estación que funciona en el Centro Experimental Humán, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, ubicado a 10 km al este de la ciudad de Los Ángeles, cercana al huerto en donde se realizó el ensayo.

**c) Modelo de Predicción de Liberación de Ascosporas**

Se pretendió establecer un modelo epidemiológico que permita identificar los períodos de liberación de ascosporas. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica de modelos que se han utilizado. Se encontró en literatura dos modelos de predicción de la madurez de ascosporas de *Venturia inaequalis* que se acercan al objetivo buscado. Los modelos que a continuación se describen, fueron utilizados y ajustados a los datos generados en los estudios:

***"A Model to Estimated the Maturity of Ascospores of Venturia inaequalis".***

Descrito por Gadoury, D.M. and MacHardy, W.E. (1982) que comienza con la acumulación de grados día desde la aparición de la primera ascospora madura. El modelo estadístico lineal de la maduración de ascosporas es una ecuación de regresión que describe la relación entre la acumulación de grados días y la maduración de ascosporas:

$$\hat{Y} = 2.51 + 0.01 X$$

$$\hat{Y}' = \hat{Y} + 0.814$$

$$\hat{Y}'' = \hat{Y} - 0.814$$

Donde:

$\hat{Y}$  = probit de proporción de ascosporas maduras

X = grados día (°C) acumulados desde la aparición de las primeras ascosporas maduras.

$\hat{Y}'$  e  $\hat{Y}''$  = límites superiores e inferiores, respectivamente, del 90 % de confianza, para la madurez estimada de ascosporas.

Sin embargo, este modelo ha sido modificado por investigadores de la Universidad de Cornell, quienes utilizaron la acumulación de grados día desde que el huerto se encuentra en el 50% de la etapa fenológica de puntas verdes. Esto se explica debido a que la aparición de la primera ascospora madura podría ser descargada del pseudotecio antes de que aparezca tejido del huésped, por lo que no ocurriría ninguna infección. Al considerar el estado de puntas verdes ya se encuentra tejido disponible que podría ser infectado, aumentando de esta manera la precisión del modelo para tomar medidas preventivas en el huerto.

#### **“Validation of an Ascospore Release Prediction Model for Apple Black spot (*Venturia inaequalis*)”.**

Modelo realizado por Beresford, R.M. (1999), en Nueva Zelandia. El recuento de ascosporas maduras se realizó usando el método de “exposed glass slide monitoring” descrito por Manktelow and Beresford (1995). La investigación se desarrolló en 5 regiones de Nueva Zelanda. El modelo consiste en una función no lineal que predice el porcentaje acumulativo de ascosporas maduras:

$$\text{Cumulative \% ascospore maturation} = 100 / (1 + e^{-0.01 * (\text{degree days} - 534)})$$

Donde, el parámetro 0.01 describe qué tan rápido procede la maduración de ascosporas y 534 corresponde a los grados día cuando el 50% de las ascosporas ha madurado, valor que se obtuvo al linearizar las curvas de porcentaje de liberación de ascosporas y los grados día de acuerdo a la función del modelo. Los valores de la función son fijos para todas las localidades estudiadas. La acumulación de grados día comienza desde el 22 de agosto. Además de grados día, el modelo de Beresford utiliza la precipitación para predecir la liberación de ascosporas.

Los modelos descritos anteriormente utilizan grados día como metodología para ser desarrollados. Ambos utilizan la temperatura base de 0°C para obtenerlo. Gadoury and MacHardy (1982) determinaron que esta temperatura obtenía una alta correlación entre el Probit de ascosporas maduras y la acumulación de grados día para estimar la maduración de ascosporas, sumadas desde la fecha de aparición de la primera ascospora en la cinta del cazaesporas.

Con los datos obtenidos del recuento de ascosporas y los datos meteorológicos entregados por la estación de Humán, se ajustó una curva sigmoidea utilizando el programa ORIGIN (Microcal software. Inc, USA, versión 3.54). Los datos ingresados al programa fueron la acumulación de grados días desde la aparición de la primera ascospora en el modelo de Gadoury, y desde el 22 de agosto para el modelo de Beresford, además del porcentaje de ascosporas para ambos modelos.

Se utilizó el programa MINITABTM (Copyright© 2000, Minitab Inc. Release13.1) para linearizar las curvas mediante transformación Probit y Logit, asumiendo normalidad. Se desarrolló los modelos de Gadoury and MacHardy (1982) y de Beresford (1999), y luego se compararon, para determinar si se ajustan o no a los datos obtenidos en Chile, específicamente en la zona de Los Ángeles.

#### **d) Aplicación de fungicidas**

El huerto recibe asesoría de la empresa exportadora, la cual envía periódicamente a un técnico que deja su recomendación de los productos más adecuados a utilizar. Debido a que la enfermedad persiste año tras año en forma intensa, a pesar del alto número de aplicaciones de fungicidas, se llevó un registro de los fungicidas aplicados durante las temporadas de estudio.

#### **e) Fenología del manzano**

La recopilación de datos meteorológicos de la zona en donde se ubica el huerto, además del estudio epidemiológico del agente causal de la sarna del manzano (*Venturia inaequalis*), permitirá construir el modelo de alerta

temprana. Sin embargo, también es importante conocer la fenología del cultivo que varía de acuerdo a los factores climáticos de las localidades en donde se encuentren ubicados los huertos de manzanos y también la variedad. En la fase de receso vegetativo se marcaron 4 yemas, dos por cada cultivar (Fuji y Gala), y se fotografiaron una vez por semana, labor que se continuó hasta completar el ciclo productivo del manzano. Con esto se obtuvo un registro fotográfico de la fenología del manzano para este huerto en particular durante la temporada 2004-2005.

## 6.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Si bien fue posible detectar ascosporas de *Venturia inaequalis* a fines de octubre de 2003, los eventos de mayor descarga ocurrieron entre el 5 y el 19 de noviembre en la temporada. La primera descarga se detectó el 17 de octubre de 2003.

En el temporada 2004-2005, la primera ascospora detectada en la cinta del cazaesporas ocurrió el 5 de septiembre en el estado fenológico del manzano de “puntas verdes”. También se detectaron las primeras conidias, lo que de acuerdo a la revisión de la cinta, se produjo el 2 de noviembre, 58 días después de la aparición de la primera ascospora. La mayor descarga de ascosporas ocurrió entre el 17 de septiembre y el 11 de octubre, contabilizándose un máximo de 2919 ascosporas el día 9 de octubre. El último día en que se pudo observar una ascospora fue el 22 de noviembre, cuando el fruto tenía entre 3 y 4 cm de diámetro. El período de mayor liberación de ascosporas coincidió entre los estados fenológicos del manzano de “plena flor” y “caída de pétalos” que, al igual que el comienzo de la liberación de ascosporas, coincide con los estudios realizados por Moller *et al* (1971) en la zona de Curicó y por Montealegre *et al* (1981) en la zona de Valdivia. Comparando los resultados obtenidos con los de la temporada anterior, se deduce que el equipo colector de ascosporas fue instalado en forma tardía el año 2003 (se instaló inmediatamente de su internación), debido a que se perdió el recuento de ascosporas en el período de mayor liberación de ellas. Sin embargo, hay que mencionar que entregó datos importantes que orientaron las labores de captura de la siguiente temporada.

La Figura 6.2 indica el recuento de ascosporas y las fechas en las cuales se observaron ascosporas en la cinta, además, de estados fenológicos del manzano durante los eventos de liberación. Comparando el número de propágulos diarios liberados, el día 9 de octubre ocurrió la mayor liberación de ascosporas de *Venturia inaequalis*, lo que debe explicarse cuando se analice los factores ambientales de liberación y maduración de ascosporas.

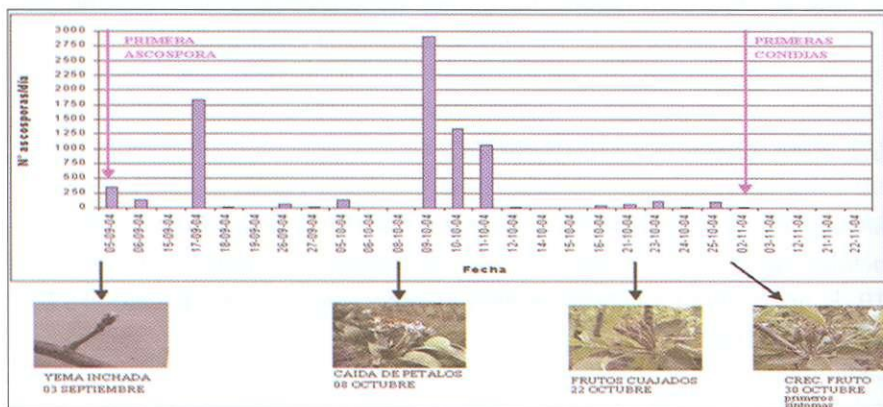


Figura 6.2. Captura de ascosporas (Nº de ascosporas/día) del hongo *Venturia inaequalis*, e imágenes de algunas etapas de la fenología del manzano durante el período de liberación de ascosporas durante la temporada agrícola 2004-2005.

La Foto 6.2 muestra una vista capturada de la observación de recuento de ascosporas sobre la cinta con pegamento, previamente teñida.



Foto 6.2. Ascosporas del hongo *Venturia inaequalis* atrapadas por el captador BURKARD en el huerto La Finca, Los Ángeles, temporada agrícola 2004-2005.



Durante las observaciones realizadas cada semana en el huerto, se detectaron los primeros síntomas de la enfermedad el día 30 de octubre del 2004, los que fueron claramente visibles en las hojas de ambos cultivares de manzano (Foto 6.3), fecha en que se encontraban en activo crecimiento. Si bien no se realizó recuento de frutos con lesiones de sarna, se encontró por lo menos en un fruto una pequeña lesión. El fruto fue llevado a laboratorio y puesto en cámara húmeda para determinar la causa de la lesión, comprobándose que fue causada por *Venturia inaequalis*.



Foto 6.3. Primeros síntomas de la Sarna del Manzano en hojas del cultivar Fuji (30 de octubre del 2004).

Los datos meteorológicos de pluviometría que se muestran en la Figura 6.3, fueron analizados de acuerdo a los días en que se encontró ascosporas en el equipo colector. Beresford (1999) y Hirst and Stedman (1962) indican que es necesario un mínimo de 0,2 mm de lluvia para que ocurra la descarga de ascosporas. La pluviometría estuvo presente en todas las fechas de descarga de ascosporas, a excepción de los días 15 y 27 de septiembre, 6, 8, 20 y 24 de octubre y 21 y 22 de noviembre. Sin embargo, en estos días el número de ascosporas encontradas, en general, fue bajo (Cuadro 6.1). Similares resultados obtuvo Miller and Waggoner (1958), quienes encontraron pequeñas cantidades de ascosporas en periodos sin lluvia. La liberación de ascosporas en período seco se explicaría producto del rocío, como lo menciona Lolas (2003), Miller and Waggoner (1958), Hirst and Stedman (1962) y MacHardy



and Gadoury (1986), quienes señalan que una descarga producida por rocío es menos significativa que una producida por efecto de la lluvia.

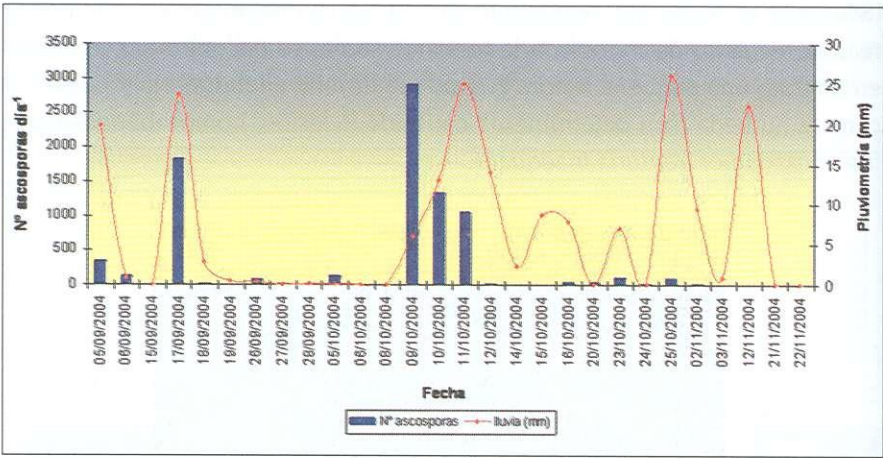


Figura 6.3. Captura de ascosporas (Nº de esporas/día) del hongo *Venturia inaequalis*, y precipitación en el huerto La Finca durante la temporada agrícola 2004-2005.

| Fecha             | 05/09/2004 | 06/09/2004 | 13/09/2004 | 17/09/2004 | 18/09/2004 | 19/09/2004 | 26/09/2004 | 27/09/2004 | 28/09/2004 | 03/10/2004 | 06/10/2004 | 08/10/2004 | 09/10/2004 | 10/10/2004 | 11/10/2004 | 12/10/2004 | 14/10/2004 | 15/10/2004 | 16/10/2004 | 17/10/2004 | 21/10/2004 | 23/10/2004 | 24/10/2004 | 25/10/2004 | 02/11/2004 | 03/11/2004 | 12/11/2004 | 21/11/2004 | 22/11/2004 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nº ascosporas     | 347        | 125        | 2          | 1829       | 16         | 1          | 81         | 13         | 2          | 130        | 9          | 7          | 2919       | 1338       | 1066       | 18         | 3          | 4          | 50         | 53         | 114        | 10         | 97         | 13         | 4          | 2          | 1          | 1          |            |
| Pluviometría (mm) | 19.8       | 1.0        | 0.2        | 23.6       | 1.6        | 0.4        | 0.4        | 0.0        | 0.2        | 0.1        | 0.0        | 0.0        | 0.0        | 13.0       | 3.0        | 14.0       | 2.3        | 8.8        | 7.8        | 9.7        | 1.0        | 0.0        | 26.0       | 9.4        | 5.8        | 12.1       | 0.0        | 0.0        |            |

Cuadro 6.1. Número de ascosporas de *Venturia inaequalis* y pluviometría en el huerto La Finca en las fechas en que hubo liberación de ascosporas de *Venturia inaequalis*, durante la temporada agrícola 2004-2005.

Con respecto a la liberación de ascosporas durante las horas del día, la Figura 6.4 muestra el porcentaje de ascosporas capturadas por el equipo para todo el período de liberación. El máximo porcentaje se obtuvo a las 19:00 horas, existiendo una tendencia a aumentar desde las 09:00 horas y una tendencia a disminuir desde las 20:00 horas. Sin embargo, no se puede concluir sobre estos resultados, debido a que no hay una tendencia clara al respecto y se

necesita, además del número de ascoporas liberadas por hora, complementar con datos de intensidad de luz y rocío durante los episodios de captura de ascoporas, ya que ambos están relacionados con la tasa de descarga de ascoporas (Gadoury *et al*, 1998; Stensvand *et al*, 1998). Gadoury *et al* (1998) señalan que durante la oscuridad es posible que se liberen ascoporas desde pseudotecios senescentes que contienen alto número de ascoporas maduras. Beresford (1999), indica que las ascoporas son liberadas entre las 06:00 y las 20:00 horas. Por su parte, MacHardy and Gadoury (1986) señalan que las horas con mayor liberación de ascoporas es entre las 07:00 y las 18:00 horas, pero esto depende de la situación geográfica del ensayo.

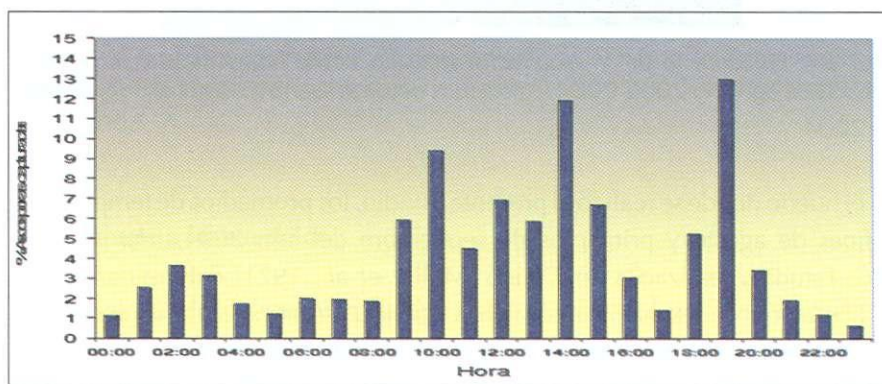


Figura 6.4. Porcentaje total de ascoporas de *Venturia inaequalis* capturadas por hora, durante el período de liberación (05-09-2004 a 22-11-2004).

Las hojas de la temporada anterior permitieron determinar la fecha de madurez de los primeros pseudotecios, lo que ocurrió con las hojas traídas desde el huerto el día 3 de septiembre de 2004. La Foto 6.4 muestra el pseudotecio con ascos y ascoporas, sin embargo, se observa claramente los ascos inmaduros de color transparente, lo que indica que la madurez de los pseudotecios se inició aproximadamente en esta fecha. Esto es similar a las investigaciones de Moller *et al* (1971) y Acuña *et al* (1994), en estudios en la VII y X regiones, respectivamente, quienes estimaron que la maduración de los pseudotecios se realiza a fines de agosto o a comienzos de septiembre. Madariaga (1975) indica que en la zona de Chillán, VIII Región, la maduración de los pseudotecios ocurre en la última semana de agosto.

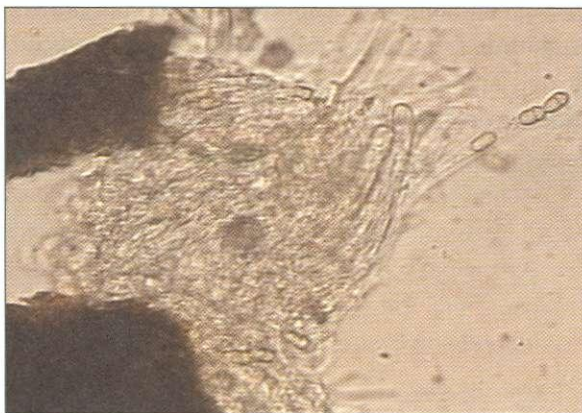


Foto 6.4. Pseudotecio de *V. inaequalis* obtenido desde hojas de manzano de la temporada agrícola 2003-2004, colectadas desde el huerto La Finca, el 3 septiembre de 2004.

En el huerto donde se realizó el presente estudio, los promedios de temperatura a fines de agosto y principios de septiembre del año 2004, fueron sobre 6°C. Estudios realizados en Curicó (Moller *et al.*, 1971) determinaron que la liberación de ascosporas comienza cuando la temperatura es cercana a 8°C, concluyendo que temperaturas bajo 5°C, a fines de agosto y primeros días de septiembre, retrasarían el comienzo de la liberación de ascosporas. Al observar la Figura 6.5, se aprecia que la temperatura adecuada para la liberación de ascosporas ocurrió los primeros días de septiembre, debido a que desde el 23 de agosto la temperatura promedio fue mayor a 8°C, y sólo el 8 de septiembre bajó hasta 6°C, para aumentar nuevamente a partir de esta fecha.

El período de captura, que estima la liberación de ascosporas desde los pseudotecios, utilizando el equipo BURKARD en el huerto La Finca, durante la temporada agrícola 2004-2005 en la zona de Los Ángeles, tuvo una duración de 11 semanas. Moller *et al.* (1971), en estudios de laboratorio en la zona de Curicó, señalan que la duración de liberación de ascosporas fue de 15 a 17 semanas.



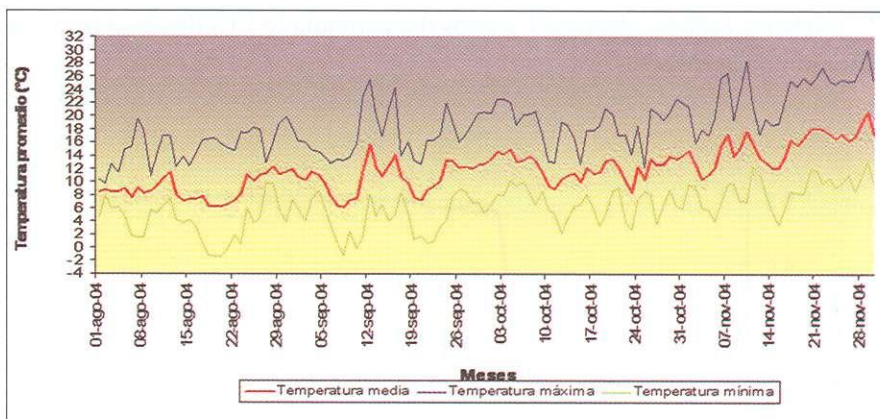


Figura 6.5. Temperaturas mínima, máxima y media en el huerto La Finca durante el período de aparición de ascosporas de *Venturia inaequalis*, temporada agrícola 2004-2005.

### 6.2.1. Ajuste a los modelos

- a) **Modelo Gadoury and MacHardy (1982).** Al ajustar los datos obtenidos a este modelo, se obtuvo una curva que grafica el porcentaje de acumulación de ascosporas liberadas de acuerdo a los días grado acumulados desde el 5 de septiembre (Figura 6.6), fecha de la aparición de las primeras ascosporas, hasta el 22 de noviembre, en que aparecieron las últimas ascosporas, cumpliéndose el 100% de liberación. Posteriormente, la curva fue ajustada a una curva sigmoidea por medio del programa ORIGIN, siendo el ajuste altamente significativo ( $Y^2=61.2744$ ,  $P=0.001$ ). La línea roja de la figura representa la curva sigmoidea ajustada a los datos aquí obtenidos y la línea negra señala la situación real del huerto La Finca en la temporada agrícola 2004-2005 (Figura 6.6). Además, se realizó el análisis Probit en el programa Minitab© y los resultados se graficaron en una planilla Excel, en la cual se agregó la línea de tendencia y se obtuvo la ecuación lineal con  $R^2=0.7642$  (Figura 6.7).

Para los datos obtenidos en el huerto de Los Ángeles, siguiendo la metodología de Gadoury and MacHardy, la ecuación sería la siguiente:

$Y = 0.046x + 3.7033$ , donde  $x$  = grados día acumulado ( $^{\circ}\text{C}$ ) desde la primera aparición de ascosporas.

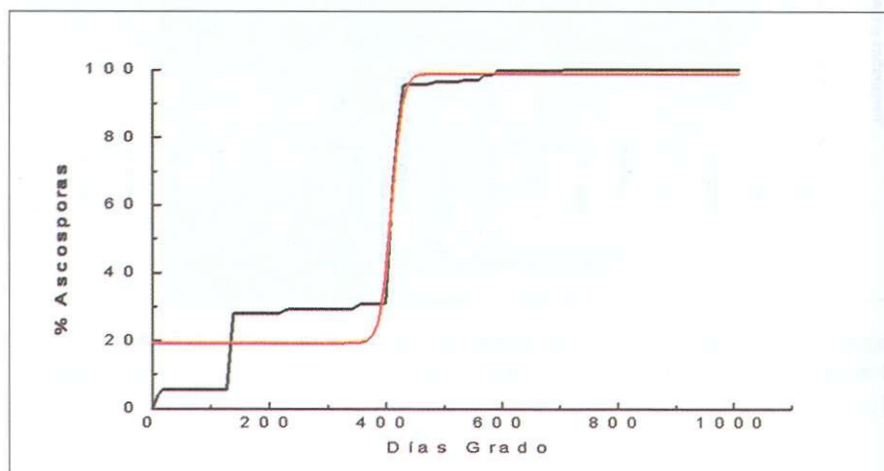


Figura 6.6. Porcentaje de liberación de ascosporas desde el 04-09-2004 (grado día cero).

Sin embargo, hay que destacar que el gráfico de análisis Probit (Figura 6.7) no es una línea recta como se esperaba, lo que ocurrió porque los datos obtenidos de la liberación de ascosporas no fue de liberación continua; es decir, hubo días en los cuales no se registraron ascosporas en la cinta y luego de ello aumentó rápidamente, por lo que el gráfico de liberación de ascosporas fue escalonado. Comparado con la metodología del modelo de Gadoury y MacHardy, dichos autores obtuvieron liberación continua debido a que realizaron el recuento sacando los pseudotecios de las hojas de la temporada anterior al estudio e hicieron el recuento de ascosporas maduras con observaciones microscópicas en laboratorio.

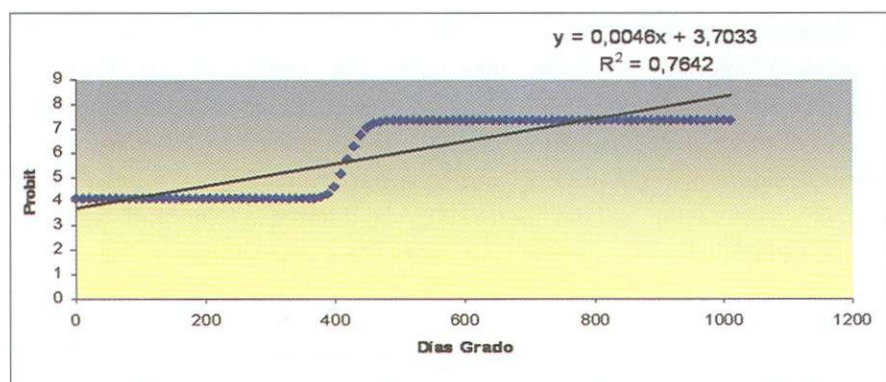


Figura 6.7. Análisis Probit de los días grado obtenidos en el huerto La Finca, la temporada agrícola 2004-2005.

Con el objetivo de comparar, se graficó los resultados obtenidos mediante el análisis Probit de los datos obtenidos en el huerto La Finca (real), (Figura 6.7). Con estos mismos datos, pero ingresados a la ecuación de Gadoury and MacHardy (modelo), se obtuvo el gráfico (Figura 6.8). Si bien la correlación fue altamente significativa,  $r=0.87$ , el modelo no se ajusta totalmente a los resultados obtenidos en Los Ángeles, dado que en varios puntos se sobrestima el porcentaje de maduración de ascoporas.

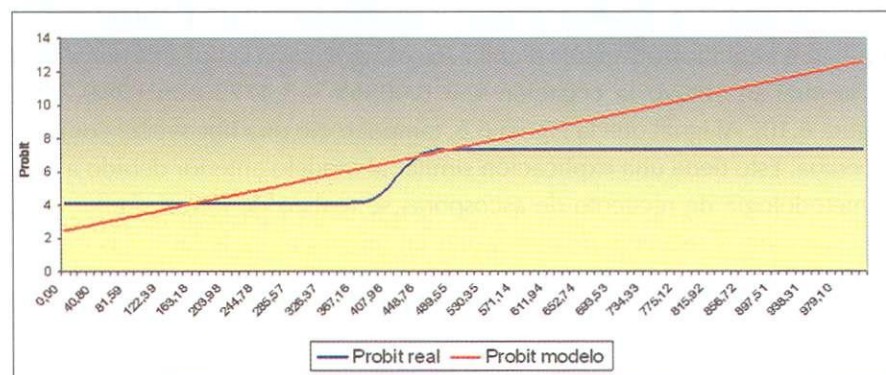


Figura 6.8. Comparación entre el Análisis Probit y el modelo de Gadoury y MacHardy. Datos del huerto La Finca, temporada agrícola 2004-2005.

b) **Modelo Beresford (1999).** Se realizó el mismo procedimiento que el modelo anterior. Se obtuvo una curva que grafica el porcentaje de liberación de ascosporas, desde el 22 de agosto, para comparar resultados con el modelo de Beresford. La curva fue ajustada con los datos a una curva sigmoidea (Figura 6.9), indicada por la línea roja. La línea negra señala la situación real del huerto La Finca, durante la temporada agrícola 2004-2005.

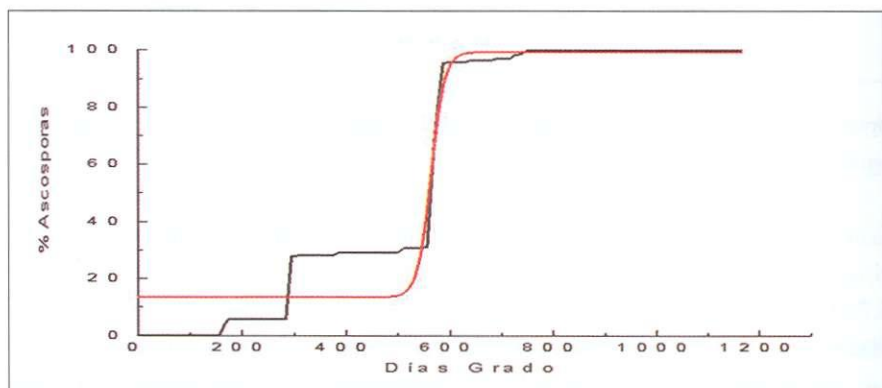


Figura 6.9. Aumento del porcentaje de liberación de ascosporas desde el 21-08-2004 (Grado Día cero).

Se realizó análisis Logit en programa Minitab© para linearizar la curva y los resultados se graficaron en una planilla Excel, agregando la línea de tendencia de la cual se obtuvo la ecuación  $Y = 0.0086X - 3.4773$  con  $R^2=0.7974$  (Figura 6.10). Al igual que la Figura 6.6, tampoco dio una línea recta como se esperaba. Esto tiene una explicación similar al modelo anterior debido a que la metodología de recuento de ascosporas se realizó de forma similar, con observaciones y recuento de ascosporas en microscopio de las hojas traídas desde el huerto.



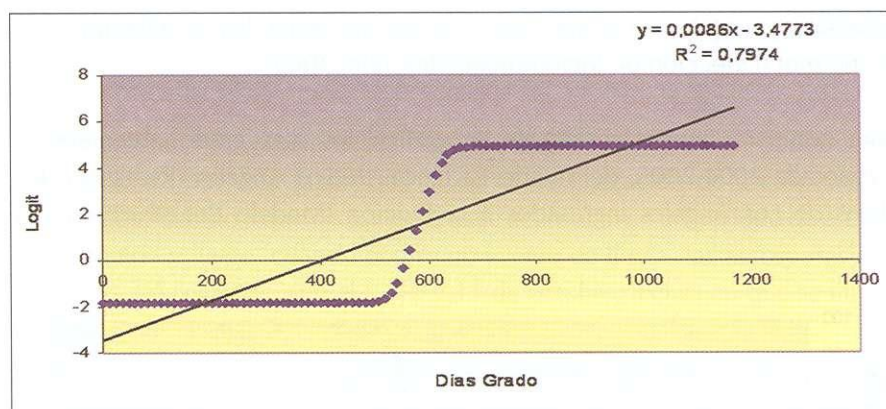


Figura 6.10. Análisis Logit de día grado obtenidos en el huerto La Finca, la temporada agrícola 2004-2005.

Si se compara la ecuación con los parámetros de regresión entregados por Beresford, se acercan bastante a los obtenidos en la región de Auckland, una de las regiones en las cuales Beresford realizó el estudio.

| Localidad   | Grados día acumulados para 50 % de liberación | Pendiente | Intercepto con eje y |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------|----------------------|
| Auckland    | 567                                           | 0.0089    | -5.06                |
| Los Angeles | 558.91*                                       | 0.0086    | -3.47                |

\* Grados día obtenidos por interpolación.

El modelo de Beresford fue validado para 5 regiones de Nueva Zelanda. A modo de comparación, la ciudad de Auckland, ubicada en la región del mismo nombre, se encuentra a 37°45' Lat (S) 174°45' Long (E) y la ciudad de Los Angeles a 37°28' Lat (S) y 71°21' long (W). Sin embargo, hay diferencias en el clima. Auckland posee un clima subtropical, con veranos húmedos y calurosos e inviernos templados. El promedio de precipitación anual es de 1.198 mm (National Institute of Water and Atmospheric Research, 2005). Por el contrario, la zona de Los Ángeles posee un clima templado cálido con



estación seca corta menor a 4 meses y promedio anual de precipitaciones de 1.300 mm (Dirección de Meteorología de Chile, 2005).

Para comparar ambos resultados se graficó los días grado obtenidos la temporada 2004-2005, del huerto La Finca, de Los Ángeles (Real), con los datos de Los Ángeles ingresados a la función (Modelo Beresford) (Figura 6.11).

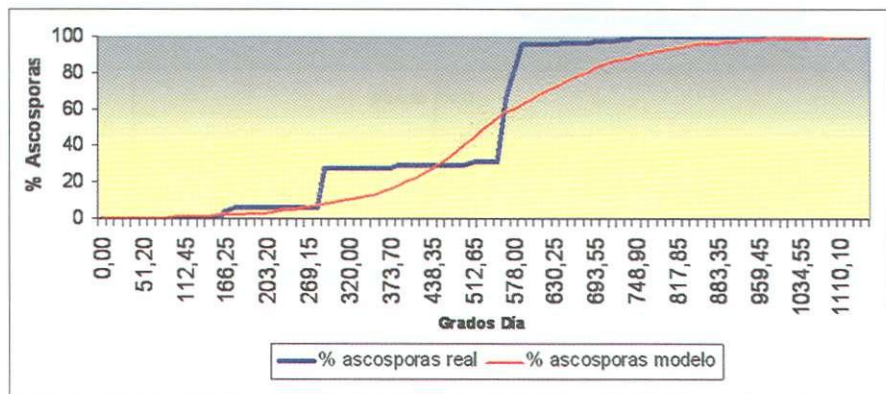


Figura 6.11. Comparación entre datos obtenidos en terreno por captura y estimados según modelo de Beresford, en el Fundo La Finca, temporada agrícola 2004-2005.

El modelo, en ciertos puntos, no explicaría la liberación de ascoporas. Sin embargo, se acerca mucho más a la realidad que el modelo de Gadoury and MacHardy. El análisis de correlación fue altamente significativo,  $r^2 = 0.97$ . Además el modelo de Beresford indica que la liberación de ascoporas se produce cuando ocurre un mínimo de 0,2 mm de precipitación. Si se analiza la Figura 6.12, cada aumento brusco del porcentaje de liberación de ascoporas fue precedido por lluvias, es así que cuando se acumulan 166.25 grados día, el 5 de septiembre la lluvia fue de 19,8 mm, y se inició el periodo de liberación de ascoporas de *Venturia inaequalis*, llegando a 4,2%. Para los 294.95 grados día, el 17 de septiembre la lluvia fue 23,6 mm, aumentando desde 5,7 a 27,9%. Luego, cuando se acumularon 568.55, 578 y 587.10 grados día para los días 9, 10 y 11 de octubre, la lluvia fue 6, 13 y 25 mm, aumentando desde 31% a 66,37, 82,59 y 95,51%, respectivamente,

y liberándose el 64,5% de todas las ascosporas de la temporada en esos días.

Evidentemente, la pluviometría fue importante durante el período de liberación. Es por esta razón que la curva de liberación de ascosporas es escalonada, debido a que las ascosporas se acumulan en un período de escasa pluviometría y luego, cuando ocurre un evento de lluvia, las ascosporas son liberadas, tal como ocurrió el 9, 10 y 11 de octubre, fechas en que se liberó el mayor porcentaje de ascosporas de la temporada.

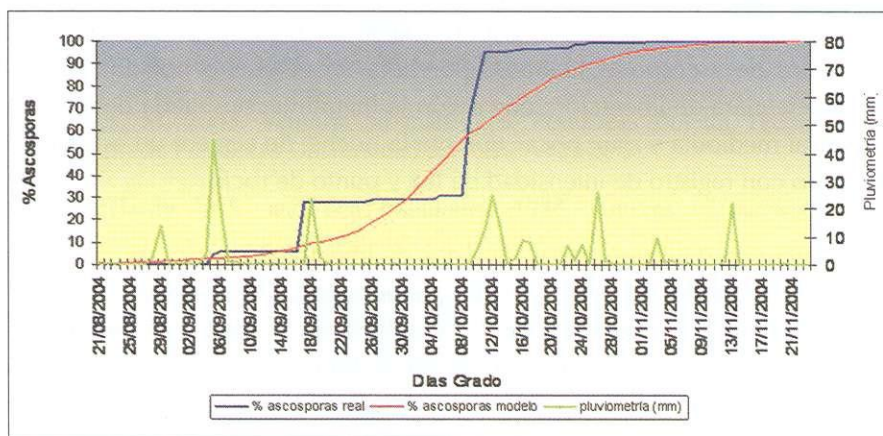


Figura 6.12. Pluviometría registrada durante la liberación de ascosporas en el Fundo La Finca, de acuerdo al modelo de Beresford y porcentaje real de liberación de ascosporas, temporada agrícola 2004-2005.

## 6.3. CONCLUSIONES

Con el método de captura y recuento de ascosporas, se logró determinar los eventos de liberación de ascosporas en el huerto, las que fueron claramente liberadas con la ocurrencia de precipitaciones. La fecha de instalación del equipo BURKARD y el comienzo de la revisión de la cinta, debe realizarse en forma temprana, en el mes de agosto. Entre las dificultades encontradas al utilizar el equipo, se puede mencionar la gran cantidad de contaminantes que son depositados en algunos días, dificultando la observación y recuentos.

Aparentemente, se trata de los días de gran movimiento de polvo en el huerto. Otra dificultad es el tiempo que toma revisar la cinta del capturador de esporas.

El inicio de la liberación de ascosporas y el período de mayor liberación de ellas, coincidió con los estados fenológicos de puntas verdes, plena flor y caída de pétalos, respectivamente. Se detectó que la aparición de la primera ascospora en la temporada 2004 – 2005, ocurrió el 5 de septiembre del 2004. Los eventos de descarga de ascosporas más importantes en el huerto, ocurrieron desde el 9 al 11 de octubre del 2004.

Los datos de ascosporas liberadas por hora en el huerto no indican una tendencia clara de liberación, que según la literatura consultada debería ser mayor al mediodía y muy pocas durante la noche. Se sugiere un estudio en el futuro con registro de intensidad de luz y punto de rocío.

Se cuenta con dos temporadas de datos de liberación de ascosporas, datos meteorológicos de temperatura y de pluviometría de la temporada 2004-2005. Sin embargo, para desarrollar y validar un modelo epidemiológico de *Venturia inaequalis* en la zona, es necesario contar con datos de varios años. Se estima que la presente investigación hace una contribución importante al entendimiento de la epidemiología del hongo causante de la Sarna del Manzano en la zona de Los Ángeles, pero se requiere de estudios climatológicos complementarios que permitan implementar el sistema de alerta temprana en la zona.

## 6.4. LITERATURA CITADA

Acuña I., P. Rizzo y C. Catalán. 1994. Liberación potencial de inóculo primario de *Venturia inaequalis* en la provincia de Osorno, X región de Chile. Agric. Téc. 54(2):81-86.

Beresford, R.M. 1999. Validation of an ascospore release prediction model for apple black spot (*Venturia inaequalis*). Proc. 52nd N.Z. Plant Protection Conf. 1999: 148-152.

Dirección de Meteorología de Chile. [en línea]. Octava Región. Descripción Climatológica. [http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_octava\\_region.html](http://www.meteochile.cl/climas/climas_octava_region.html) [Consulta: Agosto, 2005].

Gadoury, D. M. and W. E. MacHardy. 1982. A model to estimate the maturity of ascospores of *Venturia inaequalis*. *Phytopath.* 72 (7):901-904.

Gadoury, D. M., A. Stensvand and R. C. Seem. 1998. Influence of light, relative humidity, and maturity of populations on discharge of ascospores of *Venturia inaequalis*. *Phytopath.* 88:902-909.

Hirst, J.M. and O.J. Stedman. 1962. The epidemiology of apple scab (*Venturia inaequalis* (Cke) Wint.). II Observations on the liberation of ascospores. *Ann. Appl. Biol.* 50:525-550.

Lolas, M. 2003. *Venturia* en manzanos. Pomáceas Boletín Técnico. Centro de Pomáceas Universidad de Talca. V(3), N°5.

MacHardy, W.E. and D.M. Gadoury. 1986. Patterns of ascospore discharge by *Venturia inaequalis*. *Phytopath.* 76:985-990.

Madariaga, R. 1975. Control químico de la sarna del manzano *Venturia inaequalis* (cke.) Wint. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía. Universidad de Concepción. Chillán, Chile.

Miller, P.M. and P.E. Waggoner. 1958. Dissemination of *Venturia inaequalis* ascospores. *Phytopath.* 48: 426-419.

Moller, W., B. Latorre y D. Docampo. 1971. Liberación de inóculo primario de *Venturia inaequalis* (Cke.) Wint., en Chile. *Agric. Téc.* 31:27-33.

Montealegre, J., N. Andrade, y M. González. 1981. Liberación de ascosporas de *Venturia inaequalis* (Cooke) Winter en Valdivia. *Agro Sur* 9 (2):87-89.

National Institute of Water and Atmospheric Research. [en línea]. The climate of New Zealand. Northern New Zealand: Kaitaia, Whangarei, Auckland, Tauranga. [http://www.niwa.cri.nz/edu/resources/climate/overview/map\\_north](http://www.niwa.cri.nz/edu/resources/climate/overview/map_north) [Consulta: Agosto, 2005].

Stensvand, A., T. Amundsen, Semb, L., D.M. Gadoury and R.C. Seem. 1998. Discharge and dissemination of ascospores by *Venturia inaequalis* during dew. *Plant Dis.* 82:761-764.

## 6.5. ANEXOS

**Cuadro 6.2.** Datos climáticos de temperaturas máxima, mínima y media desde agosto a noviembre de 2004, en el Fundo La Finca. Días Grado base 0, desde el 22 de agosto y desde 05 septiembre de 2004. Pluviometría en el Centro Experimental Humán desde agosto a noviembre de 2004.

| Fecha      | Temperatura<br>Media (°C) | Temperatura<br>Max (°C) | Temperatura<br>Min (°C) | Lluvia<br>(mm) | Ascosporas<br>(Nº/día) | Día Grado<br>desde<br>(22/08/2004) | Día Grado<br>desde<br>(05/09/2004) |
|------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 01-08-2004 | 8,44                      | 10,40                   | 4,60                    | 1,2            | 0                      |                                    |                                    |
| 02-08-2004 | 8,66                      | 9,70                    | 7,90                    | 33,0           | 0                      |                                    |                                    |
| 03-08-2004 | 8,47                      | 12,70                   | 5,90                    | 9,4            | 0                      |                                    |                                    |
| 04-08-2004 | 8,48                      | 11,40                   | 6,10                    | 4,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 05-08-2004 | 8,91                      | 14,90                   | 4,80                    | 2,6            | 0                      |                                    |                                    |
| 06-08-2004 | 7,54                      | 15,30                   | 1,70                    | 0,2            | 0                      |                                    |                                    |
| 07-08-2004 | 8,95                      | 19,60                   | 1,60                    | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 08-08-2004 | 8,10                      | 17,60                   | 1,50                    | 0,2            | 0                      |                                    |                                    |
| 09-08-2004 | 8,60                      | 11,00                   | 5,60                    | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 10-08-2004 | 9,27                      | 14,10                   | 5,20                    | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 11-08-2004 | 10,54                     | 17,10                   | 6,30                    | 0,4            | 0                      |                                    |                                    |
| 12-08-2004 | 11,33                     | 16,90                   | 7,40                    | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 13-08-2004 | 7,89                      | 12,30                   | 4,20                    | 30,0           | 0                      |                                    |                                    |
| 14-08-2004 | 6,97                      | 13,80                   | 3,70                    | 0,2            | 0                      |                                    |                                    |
| 15-08-2004 | 7,24                      | 12,40                   | 4,20                    | 3,2            | 0                      |                                    |                                    |
| 16-08-2004 | 7,26                      | 14,20                   | 3,30                    | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 17-08-2004 | 7,69                      | 16,30                   | 0,70                    | 0,2            | 0                      |                                    |                                    |
| 18-08-2004 | 6,20                      | 16,50                   | -1,20                   | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 19-08-2004 | 6,30                      | 16,70                   | -1,40                   | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 20-08-2004 | 6,21                      | 15,70                   | -1,40                   | 0,0            | 0                      |                                    |                                    |
| 21-08-2004 | 6,52                      | 15,10                   | -0,20                   | 0,2            | 0                      |                                    |                                    |
| 22-08-2004 | 7,17                      | 14,80                   | 1,80                    | 0,2            | 0                      | 8,30                               |                                    |
| 23-08-2004 | 8,08                      | 17,50                   | 0,60                    | 0,0            | 0                      | 17,35                              |                                    |
| 24-08-2004 | 11,02                     | 17,30                   | 5,90                    | 0,0            | 0                      | 28,95                              |                                    |
| 25-08-2004 | 10,02                     | 18,20                   | 3,80                    | 0,0            | 0                      | 39,95                              |                                    |
| 26-08-2004 | 11,09                     | 17,90                   | 4,60                    | 0,0            | 0                      | 51,20                              |                                    |
| 27-08-2004 | 11,20                     | 12,90                   | 9,70                    | 2,2            | 0                      | 62,50                              |                                    |
| 28-08-2004 | 12,30                     | 16,10                   | 9,80                    | 13,8           | 0                      | 75,45                              |                                    |
| 29-08-2004 | 11,13                     | 18,90                   | 5,80                    | 0,2            | 0                      | 87,80                              |                                    |

| 30-08-2004   | 11,53                             | 19,90                           | 3,90                            | 0,2                    | 0                              | 99,70                                       |                                             |
|--------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 31-08-2004   | 11,80                             | 18,30                           | 7,20                            | 0,2                    | 0                              | 112,45                                      |                                             |
| 02-09-2004   | 10,22                             | 16,10                           | 4,10                            | 0,2                    | 0                              | 133,55                                      |                                             |
| 03-09-2004   | 11,51                             | 14,90                           | 7,20                            | 3,6                    | 0                              | 144,60                                      |                                             |
| 04-09-2004   | 10,89                             | 14,60                           | 8,80                            | 45,0                   | 0                              | 156,30                                      |                                             |
| 05-09-2004   | 9,77                              | 13,80                           | 6,10                            | 19,8                   | 347                            | 166,25                                      | 9,95                                        |
| 06-09-2004   | 7,70                              | 12,90                           | 3,50                            | 1,0                    | 125                            | 174,45                                      | 18,15                                       |
| 07-09-2004   | 6,18                              | 13,40                           | 0,50                            | 0,6                    | 0                              | 181,40                                      | 25,10                                       |
| 08-09-2004   | 6,08                              | 13,20                           | -1,20                           | 0,2                    | 0                              | 187,40                                      | 31,10                                       |
| 09-09-2004   | 7,13                              | 13,70                           | 2,40                            | 0,0                    | 0                              | 195,45                                      | 39,15                                       |
| 10-09-2004   | 7,47                              | 15,70                           | -0,20                           | 0,2                    | 0                              | 203,20                                      | 46,90                                       |
| 11-09-2004   | 11,62                             | 22,90                           | 1,70                            | 0,0                    | 0                              | 215,50                                      | 59,20                                       |
| 12-09-2004   | 15,68                             | 25,60                           | 8,10                            | 0,2                    | 0                              | 232,35                                      | 76,05                                       |
| 13-09-2004   | 12,08                             | 20,20                           | 4,80                            | 0,0                    | 0                              | 244,85                                      | 88,55                                       |
| 14-09-2004   | 10,79                             | 16,90                           | 6,50                            | 0,0                    | 0                              | 256,55                                      | 100,25                                      |
| 15-09-2004   | 12,43                             | 21,10                           | 4,10                            | 0,0                    | 2                              | 269,15                                      | 112,85                                      |
| 16-09-2004   | 14,04                             | 24,30                           | 5,00                            | 0,0                    | 0                              | 283,80                                      | 127,50                                      |
| 17-09-2004   | 10,62                             | 13,90                           | 8,40                            | 23,6                   | 1829                           | 294,95                                      | 138,65                                      |
| 18-09-2004   | 9,77                              | 16,00                           | 5,20                            | 2,8                    | 16                             | 305,55                                      | 149,25                                      |
| <b>Fecha</b> | <b>Temperatura<br/>Media (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Max (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Min (°C)</b> | <b>Lluvia<br/>(mm)</b> | <b>Ascosporas<br/>(Nº/día)</b> | <b>Día Grado<br/>desde<br/>(22/08/2004)</b> | <b>Día Grado<br/>desde<br/>(05/09/2004)</b> |
| 19-09-2004   | 7,56                              | 13,30                           | 1,20                            | 0,4                    | 1                              | 312,80                                      | 156,50                                      |
| 20-09-2004   | 7,17                              | 12,70                           | 1,70                            | 0,0                    | 0                              | 320,00                                      | 163,70                                      |
| 21-09-2004   | 8,74                              | 16,40                           | 0,70                            | 0,0                    | 0                              | 328,55                                      | 172,25                                      |
| 22-09-2004   | 9,23                              | 16,40                           | 0,80                            | 0,0                    | 0                              | 337,15                                      | 180,85                                      |
| 23-09-2004   | 10,14                             | 17,10                           | 3,10                            | 0,0                    | 0                              | 347,25                                      | 190,95                                      |
| 24-09-2004   | 13,22                             | 21,90                           | 4,00                            | 0,2                    | 0                              | 360,20                                      | 203,90                                      |
| 25-09-2004   | 13,19                             | 19,30                           | 7,70                            | 0,0                    | 0                              | 373,70                                      | 217,40                                      |
| 26-09-2004   | 12,09                             | 16,10                           | 8,90                            | 0,4                    | 81                             | 386,20                                      | 229,90                                      |
| 27-09-2004   | 12,23                             | 17,10                           | 8,60                            | 0,0                    | 13                             | 399,05                                      | 242,75                                      |
| 28-09-2004   | 11,99                             | 18,80                           | 6,80                            | 0,2                    | 2                              | 411,85                                      | 255,55                                      |
| 29-09-2004   | 12,55                             | 20,40                           | 6,80                            | 0,0                    | 0                              | 425,45                                      | 269,15                                      |
| 30-09-2004   | 12,63                             | 20,60                           | 5,20                            | 0,0                    | 0                              | 438,35                                      | 282,05                                      |
| 01-10-2004   | 13,47                             | 20,40                           | 6,50                            | 0,0                    | 0                              | 451,80                                      | 295,50                                      |
| 02-10-2004   | 14,55                             | 22,70                           | 8,10                            | 0,0                    | 0                              | 467,20                                      | 310,90                                      |
| 03-10-2004   | 14,10                             | 22,70                           | 7,80                            | 0,2                    | 0                              | 482,45                                      | 326,15                                      |
| 04-10-2004   | 14,87                             | 22,10                           | 10,20                           | 0,0                    | 0                              | 498,60                                      | 342,30                                      |

|            |       |       |       |      |      |        |        |
|------------|-------|-------|-------|------|------|--------|--------|
| 05-10-2004 | 12,92 | 18,70 | 9,40  | 0,2  | 130  | 512,65 | 356,35 |
| 06-10-2004 | 13,24 | 20,20 | 10,10 | 0,0  | 3    | 527,80 | 371,50 |
| 07-10-2004 | 13,83 | 20,30 | 8,40  | 0,0  | 0    | 542,15 | 385,85 |
| 08-10-2004 | 13,11 | 20,80 | 6,50  | 0,0  | 7    | 555,80 | 399,50 |
| 09-10-2004 | 11,23 | 16,90 | 8,60  | 6,0  | 2919 | 568,55 | 412,25 |
| 10-10-2004 | 9,30  | 13,10 | 5,80  | 13,0 | 1338 | 578,00 | 421,70 |
| 11-10-2004 | 8,91  | 13,00 | 5,20  | 25,0 | 1066 | 587,10 | 430,80 |
| 12-10-2004 | 10,34 | 19,10 | 2,10  | 14,0 | 18   | 597,70 | 441,40 |
| 13-10-2004 | 10,87 | 18,70 | 4,30  | 0,0  | 0    | 609,20 | 452,90 |
| 14-10-2004 | 11,17 | 16,50 | 6,40  | 2,2  | 3    | 620,65 | 464,35 |
| 15-10-2004 | 9,95  | 12,70 | 6,50  | 8,6  | 4    | 630,25 | 473,95 |
| 16-10-2004 | 12,12 | 17,80 | 8,10  | 7,8  | 50   | 643,20 | 486,90 |
| 17-10-2004 | 11,26 | 17,80 | 5,90  | 0,0  | 0    | 655,05 | 498,75 |
| 18-10-2004 | 11,41 | 18,60 | 3,30  | 0,0  | 0    | 666,00 | 509,70 |
| 19-10-2004 | 13,10 | 21,10 | 5,10  | 0,0  | 0    | 679,10 | 522,80 |
| 20-10-2004 | 13,43 | 20,30 | 8,60  | 0,0  | 53   | 693,55 | 537,25 |
| 21-10-2004 | 12,09 | 17,10 | 9,10  | 6,6  | 0    | 706,65 | 550,35 |
| 22-10-2004 | 10,03 | 17,10 | 3,90  | 1,6  | 0    | 717,15 | 560,85 |
| 23-10-2004 | 8,24  | 14,10 | 2,70  | 7,0  | 114  | 725,55 | 569,25 |
| 24-10-2004 | 12,27 | 18,60 | 7,20  | 0,0  | 10   | 738,45 | 582,15 |
| 25-10-2004 | 10,34 | 12,30 | 8,60  | 26,0 | 97   | 748,90 | 592,60 |
| 26-10-2004 | 13,48 | 21,20 | 8,10  | 1,2  | 0    | 763,55 | 607,25 |
| 27-10-2004 | 12,53 | 20,60 | 3,60  | 0,2  | 0    | 775,65 | 619,35 |
| 28-10-2004 | 12,70 | 19,40 | 6,60  | 0,0  | 0    | 788,65 | 632,35 |
| 29-10-2004 | 13,89 | 20,60 | 8,90  | 0,0  | 0    | 803,40 | 647,10 |
| 30-10-2004 | 13,44 | 22,70 | 6,20  | 0,0  | 0    | 817,85 | 661,55 |
| 31-10-2004 | 14,00 | 22,10 | 5,90  | 0,0  | 0    | 831,85 | 675,55 |
| 01-11-2004 | 14,69 | 21,40 | 9,60  | 0,8  | 0    | 847,35 | 691,05 |
| 02-11-2004 | 12,56 | 15,90 | 9,30  | 9,4  | 13   | 859,95 | 703,65 |
| 03-11-2004 | 10,34 | 17,90 | 6,10  | 0,8  | 4    | 871,95 | 715,65 |
| 04-11-2004 | 11,01 | 17,10 | 5,70  | 1,4  | 0    | 883,35 | 727,05 |
| 05-11-2004 | 12,14 | 19,70 | 4,10  | 0,0  | 0    | 895,25 | 738,95 |
| 06-11-2004 | 15,26 | 25,70 | 6,70  | 0,2  | 0    | 911,45 | 755,15 |
| 07-11-2004 | 17,26 | 26,60 | 9,70  | 0,0  | 0    | 929,60 | 773,30 |
| 08-11-2004 | 13,83 | 19,40 | 9,80  | 0,0  | 0    | 944,20 | 787,90 |
| 09-11-2004 | 15,00 | 23,40 | 7,10  | 0,0  | 0    | 959,45 | 803,15 |
| 10-11-2004 | 17,59 | 28,50 | 7,00  | 0,0  | 0    | 977,20 | 820,90 |
| 11-11-2004 | 15,75 | 21,80 | 12,40 | 1,0  | 0    | 994,30 | 838,00 |

| 12-11-2004   | 13,49                             | 17,20                           | 11,30                           | 22,2                   | 2                              | 1008,55                                      | 852,25                                       |
|--------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 13-11-2004   | 13,02                             | 19,60                           | 8,10                            | 0,0                    | 0                              | 1022,40                                      | 866,10                                       |
| <b>Fecha</b> | <b>Temperatura<br/>Media (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Max (°C)</b> | <b>Temperatura<br/>Min (°C)</b> | <b>Lluvia<br/>(mm)</b> | <b>Ascosporas<br/>(Nº/día)</b> | <b>Días Grado<br/>desde<br/>(22/08/2004)</b> | <b>Días Grado<br/>desde<br/>(05/09/2004)</b> |
| 14-11-2004   | 12,04                             | 18,70                           | 5,60                            | 0,0                    | 0                              | 1034,55                                      | 878,25                                       |
| 15-11-2004   | 12,09                             | 18,80                           | 3,50                            | 0,0                    | 0                              | 1045,70                                      | 889,40                                       |
| 16-11-2004   | 13,87                             | 22,20                           | 5,90                            | 0,0                    | 0                              | 1059,75                                      | 903,45                                       |
| 17-11-2004   | 16,30                             | 25,40                           | 8,60                            | 0,0                    | 0                              | 1076,75                                      | 920,45                                       |
| 18-11-2004   | 15,53                             | 24,60                           | 8,10                            | 0,0                    | 0                              | 1093,10                                      | 936,80                                       |
| 19-11-2004   | 16,64                             | 25,90                           | 8,10                            | 0,2                    | 0                              | 1110,10                                      | 953,80                                       |
| 20-11-2004   | 17,98                             | 24,90                           | 12,00                           | 0,0                    | 0                              | 1128,55                                      | 972,25                                       |
| 21-11-2004   | 18,15                             | 25,80                           | 11,80                           | 0,0                    | 1                              | 1147,35                                      | 991,05                                       |
| 22-11-2004   | 17,97                             | 27,50                           | 9,80                            | 0,0                    | 1                              | 1166,00                                      | 1009,7                                       |
| 23-11-2004   | 17,22                             | 25,40                           | 10,70                           | 0,0                    | 0                              |                                              |                                              |
| 24-11-2004   | 16,43                             | 24,90                           | 9,10                            | 0,0                    | 0                              |                                              |                                              |
| 25-11-2004   | 17,27                             | 25,60                           | 9,80                            | 0,0                    | 0                              |                                              |                                              |
| 26-11-2004   | 16,19                             | 25,20                           | 11,20                           | 0,0                    | 0                              |                                              |                                              |

Cuadro 6.3. Resultados del procedimiento para realizar el Modelo de Gadoury and MacHardy (1982). Datos utilizados para obtener curva sigmoidea (Programa Origin) y resultados de Análisis Probit (Minitab®).

| <b>Fecha</b> | <b>Días Grado<br/>acumulado</b> | <b>% Ascosporas</b> | <b>Días Grado<br/>(Sigmoidea)</b> | <b>% Ascosporas<br/>(Sigmoidea)</b> | <b>Probit real</b> | <b>Probit<br/>modelo</b> |
|--------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| 04-09-2005   | 0,00                            | 0,00                | 0,00                              | 19,54                               | 4,14               | 2,51                     |
| 05-09-2005   | 9,95                            | 4,21                | 10,20                             | 19,54                               | 4,14               | 2,61                     |
| 06-09-2005   | 18,15                           | 5,72                | 20,40                             | 19,54                               | 4,14               | 2,71                     |
| 07-09-2005   | 25,10                           | 5,72                | 30,60                             | 19,54                               | 4,14               | 2,82                     |
| 08-09-2005   | 31,10                           | 5,72                | 40,80                             | 19,54                               | 4,14               | 2,92                     |
| 09-09-2005   | 39,15                           | 5,72                | 50,99                             | 19,54                               | 4,14               | 3,02                     |
| 10-09-2005   | 46,90                           | 5,72                | 61,19                             | 19,54                               | 4,14               | 3,12                     |
| 11-09-2005   | 59,20                           | 5,72                | 71,39                             | 19,54                               | 4,14               | 3,22                     |
| 12-09-2005   | 76,05                           | 5,72                | 81,59                             | 19,54                               | 4,14               | 3,33                     |
| 13-09-2005   | 88,55                           | 5,72                | 91,79                             | 19,54                               | 4,14               | 3,43                     |
| 14-09-2005   | 100,25                          | 5,72                | 101,99                            | 19,54                               | 4,14               | 3,53                     |
| 15-09-2005   | 112,85                          | 5,75                | 112,19                            | 19,54                               | 4,14               | 3,63                     |
| 16-09-2005   | 127,50                          | 5,75                | 122,39                            | 19,54                               | 4,14               | 3,73                     |



|            |        |       |        |       |      |      |
|------------|--------|-------|--------|-------|------|------|
| 17-09-2005 | 138,65 | 27,92 | 132,59 | 19,54 | 4,14 | 3,84 |
| 18-09-2005 | 149,25 | 28,11 | 142,79 | 19,54 | 4,14 | 3,94 |
| 19-09-2005 | 156,50 | 28,12 | 152,98 | 19,54 | 4,14 | 4,04 |
| 20-09-2005 | 163,70 | 28,12 | 163,18 | 19,54 | 4,14 | 4,14 |
| 21-09-2005 | 172,25 | 28,12 | 173,38 | 19,54 | 4,14 | 4,24 |
| 22-09-2005 | 180,85 | 28,12 | 183,58 | 19,54 | 4,14 | 4,35 |
| 23-09-2005 | 190,95 | 28,12 | 193,78 | 19,54 | 4,14 | 4,45 |
| 24-09-2005 | 203,90 | 28,12 | 203,98 | 19,54 | 4,14 | 4,55 |
| 25-09-2005 | 217,40 | 28,12 | 214,18 | 19,54 | 4,14 | 4,65 |
| 26-09-2005 | 229,90 | 29,11 | 224,38 | 19,54 | 4,14 | 4,75 |
| 27-09-2005 | 242,75 | 29,26 | 234,58 | 19,54 | 4,14 | 4,86 |
| 28-09-2005 | 255,55 | 29,29 | 244,78 | 19,54 | 4,14 | 4,96 |
| 29-09-2005 | 269,15 | 29,29 | 254,97 | 19,54 | 4,14 | 5,06 |
| 30-09-2005 | 282,05 | 29,29 | 265,17 | 19,54 | 4,14 | 5,16 |
| 01-10-2005 | 295,50 | 29,29 | 275,37 | 19,54 | 4,14 | 5,26 |
| 02-10-2005 | 310,90 | 29,29 | 285,57 | 19,54 | 4,14 | 5,37 |
| 03-10-2005 | 326,15 | 29,29 | 295,77 | 19,54 | 4,14 | 5,47 |
| 04-10-2005 | 342,30 | 29,29 | 305,97 | 19,54 | 4,14 | 5,57 |
| 05-10-2005 | 356,35 | 30,86 | 316,17 | 19,54 | 4,14 | 5,67 |
| 06-10-2005 | 371,50 | 30,90 | 326,37 | 19,54 | 4,14 | 5,77 |
| 07-10-2005 | 385,85 | 30,90 | 336,57 | 19,56 | 4,14 | 5,88 |
| 08-10-2005 | 399,50 | 30,99 | 346,77 | 19,61 | 4,14 | 5,98 |
| 09-10-2005 | 412,25 | 66,37 | 356,96 | 19,76 | 4,15 | 6,08 |
| 10-10-2005 | 421,70 | 82,59 | 367,16 | 20,24 | 4,17 | 6,18 |
| 11-10-2005 | 430,80 | 95,51 | 377,36 | 21,67 | 4,22 | 6,28 |
| 12-10-2005 | 441,40 | 95,73 | 387,56 | 25,77 | 4,35 | 6,39 |
| 13-10-2005 | 452,90 | 95,73 | 397,76 | 36,08 | 4,64 | 6,49 |
| 14-10-2005 | 464,35 | 95,77 | 407,96 | 55,16 | 5,13 | 6,59 |
| 15-10-2005 | 473,95 | 95,82 | 418,16 | 76,39 | 5,72 | 6,69 |
| 16-10-2005 | 486,90 | 96,42 | 428,36 | 89,98 | 6,28 | 6,79 |
| 17-10-2005 | 498,75 | 96,42 | 438,56 | 95,88 | 6,74 | 6,90 |
| 18-10-2005 | 509,70 | 96,42 | 448,76 | 98,01 | 7,06 | 7,00 |
| 19-10-2005 | 522,80 | 96,42 | 458,95 | 98,72 | 7,23 | 7,10 |
| 20-10-2005 | 537,25 | 97,07 | 469,15 | 98,96 | 7,31 | 7,20 |
| 21-10-2005 | 550,35 | 97,07 | 479,35 | 99,03 | 7,34 | 7,30 |
| 22-10-2005 | 560,85 | 97,07 | 489,55 | 99,06 | 7,35 | 7,41 |
| 23-10-2005 | 569,25 | 98,45 | 499,75 | 99,06 | 7,35 | 7,51 |

| <b>Fecha</b> | <b>Días Grado<br/>acumulado</b> | <b>% Ascosporas</b> | <b>Días Grado<br/>(Sigmoidea)</b> | <b>% Ascosporas<br/>(Sigmoidea)</b> | <b>Probit real</b> | <b>Probit<br/>modelo</b> |
|--------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| 24-10-2005   | 582,15                          | 98,57               | 509,95                            | 99,07                               | 7,35               | 7,61                     |
| 25-10-2005   | 592,60                          | 99,75               | 520,15                            | 99,07                               | 7,35               | 7,71                     |
| 26-10-2005   | 607,25                          | 99,75               | 530,35                            | 99,07                               | 7,35               | 7,81                     |
| 27-10-2005   | 619,35                          | 99,75               | 540,55                            | 99,07                               | 7,35               | 7,92                     |
| 28-10-2005   | 632,35                          | 99,75               | 550,75                            | 99,07                               | 7,35               | 8,02                     |
| 29-10-2005   | 647,10                          | 99,75               | 560,94                            | 99,07                               | 7,35               | 8,12                     |
| 30-10-2005   | 661,55                          | 99,75               | 571,14                            | 99,07                               | 7,35               | 8,22                     |
| 31-10-2005   | 675,55                          | 99,75               | 581,34                            | 99,07                               | 7,35               | 8,32                     |
| 01-11-2005   | 691,05                          | 99,75               | 591,54                            | 99,07                               | 7,35               | 8,43                     |
| 02-11-2005   | 703,65                          | 99,90               | 601,74                            | 99,07                               | 7,35               | 8,53                     |
| 03-11-2005   | 715,65                          | 99,95               | 611,94                            | 99,07                               | 7,35               | 8,63                     |
| 04-11-2005   | 727,05                          | 99,95               | 622,14                            | 99,07                               | 7,35               | 8,73                     |
| 05-11-2005   | 738,95                          | 99,95               | 632,34                            | 99,07                               | 7,35               | 8,83                     |
| 06-11-2005   | 755,15                          | 99,95               | 642,54                            | 99,07                               | 7,35               | 8,94                     |
| 07-11-2005   | 773,30                          | 99,95               | 652,74                            | 99,07                               | 7,35               | 9,04                     |
| 08-11-2005   | 787,90                          | 99,95               | 662,93                            | 99,07                               | 7,35               | 9,14                     |
| 09-11-2005   | 803,15                          | 99,95               | 673,13                            | 99,07                               | 7,35               | 9,24                     |
| 10-11-2005   | 820,90                          | 99,95               | 683,33                            | 99,07                               | 7,35               | 9,34                     |
| 11-11-2005   | 838,00                          | 99,95               | 693,53                            | 99,07                               | 7,35               | 9,45                     |
| 12-11-2005   | 852,25                          | 99,98               | 703,73                            | 99,07                               | 7,35               | 9,55                     |
| 13-11-2005   | 866,10                          | 99,98               | 713,93                            | 99,07                               | 7,35               | 9,65                     |
| 14-11-2005   | 878,25                          | 99,98               | 724,13                            | 99,07                               | 7,35               | 9,75                     |
| 15-11-2005   | 889,40                          | 99,98               | 734,33                            | 99,07                               | 7,35               | 9,85                     |
| 16-11-2005   | 903,45                          | 99,98               | 744,53                            | 99,07                               | 7,35               | 9,96                     |
| 17-11-2005   | 920,45                          | 99,98               | 754,73                            | 99,07                               | 7,35               | 10,06                    |
| 18-11-2005   | 936,80                          | 99,98               | 764,92                            | 99,07                               | 7,35               | 10,16                    |
| 19-11-2005   | 953,80                          | 99,98               | 775,12                            | 99,07                               | 7,35               | 10,26                    |
| 20-11-2005   | 972,25                          | 99,98               | 785,32                            | 99,07                               | 7,35               | 10,36                    |
| 21-11-2005   | 991,05                          | 99,99               | 795,52                            | 99,07                               | 7,35               | 10,47                    |
| 22-11-2005   | 1009,70                         | 100,00              | 805,72                            | 99,07                               | 7,35               | 10,57                    |
|              |                                 |                     | 815,92                            | 99,07                               | 7,35               | 10,67                    |
|              |                                 |                     | 826,12                            | 99,07                               | 7,35               | 10,77                    |
|              |                                 |                     | 836,32                            | 99,07                               | 7,35               | 10,87                    |
|              |                                 |                     | 846,52                            | 99,07                               | 7,35               | 10,98                    |
|              |                                 |                     | 856,72                            | 99,07                               | 7,35               | 11,08                    |
|              |                                 |                     | 866,91                            | 99,07                               | 7,35               | 11,18                    |

|  |  |  |         |       |      |       |
|--|--|--|---------|-------|------|-------|
|  |  |  | 877,11  | 99,07 | 7,35 | 11,28 |
|  |  |  | 887,31  | 99,07 | 7,35 | 11,38 |
|  |  |  | 897,51  | 99,07 | 7,35 | 11,49 |
|  |  |  | 907,71  | 99,07 | 7,35 | 11,59 |
|  |  |  | 917,91  | 99,07 | 7,35 | 11,69 |
|  |  |  | 928,11  | 99,07 | 7,35 | 11,79 |
|  |  |  | 938,31  | 99,07 | 7,35 | 11,89 |
|  |  |  | 948,51  | 99,07 | 7,35 | 12,00 |
|  |  |  | 958,71  | 99,07 | 7,35 | 12,10 |
|  |  |  | 968,90  | 99,07 | 7,35 | 12,20 |
|  |  |  | 979,10  | 99,07 | 7,35 | 12,30 |
|  |  |  | 989,30  | 99,07 | 7,35 | 12,40 |
|  |  |  | 999,50  | 99,07 | 7,35 | 12,51 |
|  |  |  | 1009,70 | 99,07 | 7,35 | 12,61 |

**Cuadro 6.4.** Resultados del procedimiento para realizar el Modelo de Beresford (1999). Datos utilizados para obtener curva sigmoidea (Programa Origin) y resultados de Análisis Logit (Minitab©).

| <i>Fecha</i> | <i>Días Grado<br/>acumulado</i> | <i>% Ascosporas</i> | <i>Días Grado<br/>(Sigmoidea)</i> | <i>% Ascosporas<br/>(Sigmoidea)</i> | <i>Logit</i> | <i>% Ascosporas<br/>modelo</i> |
|--------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------|
| 21-08-04     | 0,00                            | 0,00                | 0,00                              | 13,46                               | -1,86        | 0,48                           |
| 22-08-04     | 8,30                            | 0,00                | 11,78                             | 13,46                               | -1,86        | 0,52                           |
| 23-08-04     | 17,35                           | 0,00                | 23,56                             | 13,46                               | -1,86        | 0,57                           |
| 24-08-04     | 28,95                           | 0,00                | 35,33                             | 13,46                               | -1,86        | 0,64                           |
| 25-08-04     | 39,95                           | 0,00                | 47,11                             | 13,46                               | -1,86        | 0,71                           |
| 26-08-04     | 51,20                           | 0,00                | 58,89                             | 13,46                               | -1,86        | 0,79                           |
| 27-08-04     | 62,50                           | 0,00                | 70,67                             | 13,46                               | -1,86        | 0,89                           |
| 28-08-04     | 75,45                           | 0,00                | 82,44                             | 13,46                               | -1,86        | 1,01                           |
| 29-08-04     | 87,80                           | 0,00                | 94,22                             | 13,46                               | -1,86        | 1,14                           |
| 30-08-04     | 99,70                           | 0,00                | 106,00                            | 13,46                               | -1,86        | 1,28                           |
| 31-08-04     | 112,45                          | 0,00                | 117,78                            | 13,46                               | -1,86        | 1,46                           |
| 01-09-04     | 123,45                          | 0,00                | 129,56                            | 13,46                               | -1,86        | 1,62                           |
| 02-09-04     | 133,55                          | 0,00                | 141,33                            | 13,46                               | -1,86        | 1,79                           |
| 03-09-04     | 144,60                          | 0,00                | 153,11                            | 13,46                               | -1,86        | 2,00                           |
| 04-09-04     | 156,30                          | 0,00                | 164,89                            | 13,46                               | -1,86        | 2,24                           |
| 05-09-04     | 166,25                          | 4,21                | 176,67                            | 13,46                               | -1,86        | 2,47                           |
| 06-09-04     | 174,45                          | 5,72                | 188,44                            | 13,46                               | -1,86        | 2,67                           |

| 07-09-04     | 181,40                          | 5,72                | 200,22                            | 13,46                               | -1,86        | 2,86                           |
|--------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------|
| 08-09-04     | 187,40                          | 5,72                | 212,00                            | 13,46                               | -1,86        | 3,03                           |
| 09-09-04     | 195,45                          | 5,72                | 223,78                            | 13,46                               | -1,86        | 3,28                           |
| 10-09-04     | 203,20                          | 5,72                | 235,56                            | 13,46                               | -1,86        | 3,53                           |
| 11-09-04     | 215,50                          | 5,72                | 247,33                            | 13,46                               | -1,86        | 3,97                           |
| 12-09-04     | 232,35                          | 5,72                | 259,11                            | 13,46                               | -1,86        | 4,67                           |
| 13-09-04     | 244,85                          | 5,72                | 270,89                            | 13,46                               | -1,86        | 5,26                           |
| 14-09-04     | 256,55                          | 5,72                | 282,67                            | 13,46                               | -1,86        | 5,87                           |
| 15-09-04     | 269,15                          | 5,75                | 294,44                            | 13,46                               | -1,86        | 6,61                           |
| 16-09-04     | 283,80                          | 5,75                | 306,22                            | 13,46                               | -1,86        | 7,57                           |
| 17-09-04     | 294,95                          | 27,92               | 318,00                            | 13,46                               | -1,86        | 8,39                           |
| 18-09-04     | 305,55                          | 28,11               | 329,78                            | 13,46                               | -1,86        | 9,24                           |
| 19-09-04     | 312,80                          | 28,12               | 341,56                            | 13,46                               | -1,86        | 9,87                           |
| 20-09-04     | 320,00                          | 28,12               | 353,33                            | 13,46                               | -1,86        | 10,53                          |
| 21-09-04     | 328,55                          | 28,12               | 365,11                            | 13,46                               | -1,86        | 11,36                          |
| 22-09-04     | 337,15                          | 28,12               | 376,89                            | 13,46                               | -1,86        | 12,26                          |
| 23-09-04     | 347,25                          | 28,12               | 388,67                            | 13,46                               | -1,86        | 13,38                          |
| 24-09-04     | 360,20                          | 28,12               | 400,44                            | 13,46                               | -1,86        | 14,96                          |
| 25-09-04     | 373,70                          | 28,12               | 412,22                            | 13,46                               | -1,86        | 16,76                          |
| 26-09-04     | 386,20                          | 29,11               | 424,00                            | 13,46                               | -1,86        | 18,57                          |
| 27-09-04     | 399,05                          | 29,26               | 435,78                            | 13,46                               | -1,86        | 20,60                          |
| 28-09-04     | 411,85                          | 29,29               | 447,56                            | 13,47                               | -1,86        | 22,77                          |
| 29-09-04     | 425,45                          | 29,29               | 459,33                            | 13,49                               | -1,86        | 25,25                          |
| 30-09-04     | 438,35                          | 29,29               | 471,11                            | 13,53                               | -1,86        | 27,76                          |
| 01-10-04     | 451,80                          | 29,29               | 482,89                            | 13,63                               | -1,85        | 30,53                          |
| 02-10-04     | 467,20                          | 29,29               | 494,67                            | 13,87                               | -1,83        | 33,89                          |
| 03-10-04     | 482,45                          | 29,29               | 506,44                            | 14,49                               | -1,78        | 37,39                          |
| 04-10-04     | 498,60                          | 29,29               | 518,22                            | 16,00                               | -1,66        | 41,24                          |
| 05-10-04     | 512,65                          | 30,86               | 530,00                            | 19,56                               | -1,41        | 44,68                          |
| 06-10-04     | 527,80                          | 30,90               | 541,78                            | 27,27                               | -0,98        | 48,45                          |
| 07-10-04     | 542,15                          | 30,90               | 553,56                            | 41,33                               | -0,35        | 52,04                          |
| 08-10-04     | 555,80                          | 30,99               | 565,33                            | 60,38                               | 0,42         | 55,43                          |
| 09-10-04     | 568,55                          | 66,37               | 577,11                            | 77,96                               | 1,26         | 58,55                          |
| <b>Fecha</b> | <b>Días Grado<br/>acumulado</b> | <b>% Ascosporas</b> | <b>Días Grado<br/>(Sigmoidea)</b> | <b>% Ascosporas<br/>(Sigmoidea)</b> | <b>Logit</b> | <b>% Ascosporas<br/>modelo</b> |
| 10-10-04     | 578,00                          | 82,59               | 588,89                            | 89,29                               | 2,12         | 60,83                          |
| 11-10-04     | 587,10                          | 95,51               | 600,67                            | 95,00                               | 2,94         | 62,97                          |
| 12-10-04     | 597,70                          | 95,73               | 612,44                            | 97,52                               | 3,67         | 65,41                          |

|          |         |       |         |       |      |       |
|----------|---------|-------|---------|-------|------|-------|
| 13-10-04 | 609,20  | 95,73 | 624,22  | 98,57 | 4,23 | 67,96 |
| 14-10-04 | 620,65  | 95,77 | 636,00  | 98,99 | 4,59 | 70,40 |
| 15-10-04 | 630,25  | 95,82 | 647,78  | 99,17 | 4,78 | 72,36 |
| 16-10-04 | 643,20  | 96,42 | 659,56  | 99,23 | 4,86 | 74,88 |
| 17-10-04 | 655,05  | 96,42 | 671,33  | 99,26 | 4,90 | 77,04 |
| 18-10-04 | 666,00  | 96,42 | 683,11  | 99,27 | 4,92 | 78,92 |
| 19-10-04 | 679,10  | 96,42 | 694,89  | 99,28 | 4,92 | 81,02 |
| 20-10-04 | 693,55  | 97,07 | 706,67  | 99,28 | 4,92 | 83,14 |
| 21-10-04 | 706,65  | 97,07 | 718,44  | 99,28 | 4,93 | 84,90 |
| 22-10-04 | 717,15  | 97,07 | 730,22  | 99,28 | 4,93 | 86,19 |
| 23-10-04 | 725,55  | 98,45 | 742,00  | 99,28 | 4,93 | 87,16 |
| 24-10-04 | 738,45  | 98,57 | 753,78  | 99,28 | 4,93 | 88,54 |
| 25-10-04 | 748,90  | 99,75 | 765,56  | 99,28 | 4,93 | 89,56 |
| 26-10-04 | 763,55  | 99,75 | 777,33  | 99,28 | 4,93 | 90,85 |
| 27-10-04 | 775,65  | 99,75 | 789,11  | 99,28 | 4,93 | 91,81 |
| 28-10-04 | 788,65  | 99,75 | 800,89  | 99,28 | 4,93 | 92,73 |
| 29-10-04 | 803,40  | 99,75 | 812,67  | 99,28 | 4,93 | 93,67 |
| 30-10-04 | 817,85  | 99,75 | 824,44  | 99,28 | 4,93 | 94,47 |
| 31-10-04 | 831,85  | 99,75 | 836,22  | 99,28 | 4,93 | 95,16 |
| 01-11-04 | 847,35  | 99,75 | 848,00  | 99,28 | 4,93 | 95,83 |
| 02-11-04 | 859,95  | 99,90 | 859,78  | 99,28 | 4,93 | 96,30 |
| 03-11-04 | 871,95  | 99,95 | 871,56  | 99,28 | 4,93 | 96,71 |
| 04-11-04 | 883,35  | 99,95 | 883,33  | 99,28 | 4,93 | 97,05 |
| 05-11-04 | 895,25  | 99,95 | 895,11  | 99,28 | 4,93 | 97,37 |
| 06-11-04 | 911,45  | 99,95 | 906,89  | 99,28 | 4,93 | 97,76 |
| 07-11-04 | 929,60  | 99,95 | 918,67  | 99,28 | 4,93 | 98,12 |
| 08-11-04 | 944,20  | 99,95 | 930,44  | 99,28 | 4,93 | 98,37 |
| 09-11-04 | 959,45  | 99,95 | 942,22  | 99,28 | 4,93 | 98,60 |
| 10-11-04 | 977,20  | 99,95 | 954,00  | 99,28 | 4,93 | 98,82 |
| 11-11-04 | 994,30  | 99,95 | 965,78  | 99,28 | 4,93 | 99,01 |
| 12-11-04 | 1008,55 | 99,98 | 977,56  | 99,28 | 4,93 | 99,14 |
| 13-11-04 | 1022,40 | 99,98 | 989,33  | 99,28 | 4,93 | 99,25 |
| 14-11-04 | 1034,55 | 99,98 | 1001,11 | 99,28 | 4,93 | 99,33 |
| 15-11-04 | 1045,70 | 99,98 | 1012,89 | 99,28 | 4,93 | 99,40 |
| 16-11-04 | 1059,75 | 99,98 | 1024,67 | 99,28 | 4,93 | 99,48 |
| 17-11-04 | 1076,75 | 99,98 | 1036,44 | 99,28 | 4,93 | 99,56 |
| 18-11-04 | 1093,10 | 99,98 | 1048,22 | 99,28 | 4,93 | 99,63 |
| 19-11-04 | 1110,10 | 99,98 | 1060,00 | 99,28 | 4,93 | 99,69 |

|          |         |         |         |       |      |       |
|----------|---------|---------|---------|-------|------|-------|
| 20-11-04 | 1128,55 | 99,98   | 1071,78 | 99,28 | 4,93 | 99,74 |
| 21-11-04 | 1147,35 | 99,99   | 1083,56 | 99,28 | 4,93 | 99,78 |
| 22-11-04 | 1166,00 | 100,00  | 1095,33 | 99,28 | 4,93 | 99,82 |
|          |         | 1107,11 | 99,28   | 4,93  |      |       |
|          |         | 1118,89 | 99,28   | 4,93  |      |       |
|          |         | 1130,67 | 99,28   | 4,93  |      |       |
|          |         | 1142,44 | 99,28   | 4,93  |      |       |
|          |         | 1154,22 | 99,28   | 4,93  |      |       |
|          |         | 1166,00 | 99,28   | 4,93  |      |       |

Figura 6.13. Fenología Manzano cv. Fuji, Fundo La Finca (Los Ángeles), temporada agrícola 2004-2005.



02 junio



20 agosto



27 agosto



03 septiembre



10 septiembre



15 septiembre



23 septiembre



01 octubre



08 octubre



15 octubre



22 octubre



30 octubre



05 noviembre



12 noviembre



18 noviembre



26 noviembre

## CAPÍTULO 7

### **SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DEL TIZÓN TARDÍO (*PHYTOPHTHORA INFESTANS*) DE LA PAPA**

*Autores*

**Ivette Acuña B.**

Ing. Agr., Ph. D. INIA Remehue.  
Osorno, Chile.  
iacuna@inia.cl

**Gary A. Secor**

Ph.D., Professor. North Dakota  
State University, U.S.A.  
gary.secor@ndsu.nodak.edu

**Viviana Rivera**

Mg. Sc. North Dakota State  
University, U.S.A.  
viviana.rivera@ndsu.nodak.edu

**Rodrigo Bravo H.**

Ing. Agr. INIA Remehue,  
Osorno, Chile.  
rbravo@inia.cl



## 7.1. INTRODUCCIÓN

### 7.1.1. El cultivo de la papa en Chile

La papa es uno de los cultivos más importantes, tanto social como económicamente en Chile. Es cultivada a lo largo del país con la producción comercial para fresco en la zona norte y central y producción de semilla en la zona sur. Este cultivo ocupa en el país el cuarto lugar de importancia en términos de la superficie con cultivos anuales, con un promedio en las últimas dos décadas de 60.000 hectáreas y una producción anual del orden de 990.000 toneladas (ODEPA, 2006).

Debido a que el país posee excelentes condiciones para el cultivo, la papa es producida durante todo el año, debido a que se distribuye a través de una amplia zona geográfica. Se debe destacar una importante concentración en la zona sur, con un 56% de la superficie total entre las regiones IX y X (ODEPA, 2006). Respecto a los rendimientos, según datos del INE, para la temporada 2004/05, el promedio nacional fue de alrededor de 20 t/ha, concentrándose los mayores rendimientos en la IX y X regiones con 18,4 y 23,8 t/ha respectivamente. En estas regiones el cultivo se caracteriza por ser cosechado a madurez fisiológica, situación que concentra las cosechas durante los meses de marzo, abril y mayo (Fundación Chile, 2001). Al respecto, es necesario indicar que si bien los rendimientos nacionales denotan una clara tendencia de mejoramiento, el nivel promedio aún es muy inferior a los obtenidos por países como Argentina (29,5 t/ha), Estados Unidos (40,2 t/ha) u Holanda (44,8 t/ha). La producción nacional de papas durante la temporada 2004/05 fue cercana a 1.115.736 toneladas, experimentando variaciones a través de los años, debido, principalmente, a cambios en la superficie cultivada como en los rendimientos. Sin embargo, al hacer ajustes se obtiene una tendencia al aumento de la producción nacional. Respecto a las principales zonas productoras, la IX y X regiones aportan, en promedio, el 62,03% de la producción nacional de papas (INDAP, 2001).

En nuestro país las producciones de papa son principalmente destinadas al mercado interno como papa de consumo fresco. Las exportaciones a Brasil

y otros países sudamericanos están aumentando y, aparentemente, existe un gran potencial para abrir nuevos mercados en Latinoamérica y otros continentes. Durante 1999, Chile exportó 4.736 toneladas de productos de papa, destacando entre ellos la exportación de papa consumo (2.691 t), producto deshidratado (1.321 t), tubérculos semillas (545 t) y preparadas congeladas (117 t), destinados, principalmente, a mercados sudamericanos y por un valor total de US\$ 3,18 millones. A pesar de que Chile presenta condiciones edafoclimáticas favorables para la producción de papas, especialmente en la IX y X regiones, existe una brecha tecnológica en el cultivo de la papa respecto a los países desarrollados, por lo que es necesario reducir aún más los costos de los insumos, mediante la introducción y adopción de técnicas modernas.

### **7.1.2. Situación sanitaria de la papa en la zona sur**

Una de las grandes limitantes en la producción de papa son los problemas fitopatológicos, los que producen pérdidas importantes en los rendimientos y calidad de los productos y afectan gravemente las exportaciones. Actualmente, el control de enfermedades fungosas, insectos y nemátodos se basa en el uso de grandes cantidades de fungicidas, insecticidas y nematicidas, respectivamente, los cuales además de ser costosos, representan un riesgo para la salud de las personas y el medio ambiente. La mejor estrategia de control de plagas y enfermedades es indudablemente la aplicación de un manejo integrado de ellas en el cultivo de la papa. En el manejo integrado de plagas y enfermedades se hace uso de factores genéticos, agronómicos y culturales, reduciendo la necesidad del uso de productos químicos en el control.

El Compendio de las Enfermedades de la Papa describe 150 patógenos asociados al cultivo de papa a nivel mundial, incluyendo hongos, nemátodos, bacterias, micoplasmas, virus y viroides (Hooker, 1980). Muchos agentes causales son capaces de afectar la productividad o la utilidad del cultivo.

En Chile, algunas de estas enfermedades han sido descritas, muchas de las cuales son endémicas al cultivo. El Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), a

través del proyecto “Control Enfermedades de la Papa”, describe en el Manual “Enfermedades y Plagas de la Papa en el sur de Chile” 13 enfermedades endémicas producidas por hongos asociados al cultivo de la papa en la X Región (SAG, 2000). Entre éstas, el tizón tardío de la papa ha incrementado su incidencia en la zona sur en los últimos años, produciendo pérdidas de hasta el 50% del rendimiento.

## 7.2. TIZÓN TARDÍO DE LA PAPA

El tizón tardío es una enfermedad causada por el hongo (*Phytophthora infestans*). Es la enfermedad más grave que afecta el cultivo de la papa y está ampliamente distribuida en el mundo. El tizón tardío es una enfermedad que avanza rápidamente y puede abarcar grandes superficies cuando las condiciones climáticas son favorables (Secor, 2003).

La enfermedad afecta hojas, tallos y tubérculos. Los primeros síntomas aparecen en las hojas inferiores, generalmente en los bordes, como pequeñas manchas acuosas de color verde oscuro. Bajo condiciones de alta humedad, estas lesiones se expanden rápidamente formando zonas café atizonadas irregulares. Un borde amarillo pálido alrededor de la lesión separa el tejido sano del enfermo. En condiciones de alta humedad o temprano en las mañanas, es posible distinguir el micelio del hongo como un crecimiento aterciopelado de color blanco en el envés de las hojas más bajas. Si las condiciones de alta humedad continúan, todo el follaje se afecta, colapsa y muere. En cambio, si le siguen condiciones secas a la infección, la enfermedad se detiene y permanece latente hasta que las condiciones óptimas se repitan (Acuña y Torres, 2000).

En los tallos se forman lesiones de color café púrpura por infección directa o por extensión de la lesión de los pecíolos de las hojas. Los tallos afectados se tornan frágiles y quebradizos. Los tubérculos afectados forman lesiones externas de color café púrpuras de forma irregular y hundidas. Al cortar el tubérculo, el tejido inmediatamente bajo la lesión es de color café cobrizo, de textura granular y firme (Acuña y Torres, 2000).

Este hongo sobrevive sólo en tejido vivo como tubérculos, plantas voluntarias y otros hospederos como tomate, petunia y otras solanáceas. A diferencia de Chile, en Europa y México puede sobrevivir en el suelo como oospora, debido a la presencia de diferentes grupos de apareamiento (Secor, 2003).

Desde tubérculos infectados, el micelio crece alcanzando los brotes, produciendo colapso celular. Cuando el micelio alcanza la parte aérea de la planta, produce las estructuras reproductivas (zoosporangios). Las esporangias se producen en temperaturas bajas, acompañadas de alta humedad relativa, requiriendo al menos de 12 horas en estas condiciones para que se produzca infección y entre 5 y 7 días para desarrollar los primeros síntomas. Éstas son dispersadas por el agua de lluvia y el viento, depositándose en hojas y tallos húmedos, donde inician una nueva infección. Bajo condiciones húmedas, nuevos zoosporangios y zoosporas son formadas, con lo que una gran cantidad de nuevas infecciones puede ser producida en una estación de crecimiento. La infección de los tubérculos comienza cuando las zoosporas son lavadas por la lluvia desde las hojas y caen al suelo, donde infectan los tubérculos por las lenticelas o heridas. Los tubérculos también pueden infectarse al momento de cosecha al tomar contacto con follaje enfermo o con tubérculos enfermos durante la manipulación y selección de semilla (Acuña y Torres, 2000).

El desarrollo de epidemias de tizón tardío dependerá, principalmente, de las condiciones ambientales predominantes durante el cultivo. El hongo crece y esporula mejor en humedades relativas cercanas al 100% y temperaturas de entre 15 y 25°C. Las zoosporas necesitan agua libre para su germinación y penetración. Una vez que la infección se produce, la enfermedad se desarrolla más rápidamente a temperaturas de 21°C (Agrios, 1997). En el sur de Chile, la ocurrencia de condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de tizón tardío son variables, de acuerdo a cada temporada y zona geográfica.

### **7.2.1. Tizón Tardío de la Papa (*Phytophthora infestans*)**

Anton de Bary fue quien bautizó al hongo como *Phytophthora*, “destructor de plantas”, en 1876 cuando describió el agente causal del tizón tardío. En

ese entonces lo describió como una nueva especie y de importancia como destructor de cultivos, luego de la “Hambruna de Irlanda” que el tizón causó en los 1840`s (Zentmyer, 1983).

*P. infestans* está clasificado dentro de los hongos Oomycetes, los cuales, según la clasificación, pertenecerían a los Reinos Protoctista o Cromista (Dick, 1995; Erwin and Ribeiro, 1996; Alexopoulos *et al*, 1996). Este grupo no se clasifica dentro de los hongos comunes debido a la ausencia de quitina en su pared celular, zoosporas con flagelos heterokonticos desde esporangias, núcleos diploides en las células vegetativas y reproducción sexual vía anteridio y oogonio (Fry and Goodwin, 1997).

La especie *P. infestans* es heterotálica, o sea con grupos de apareamiento A1 y A2. Mundialmente predominaba el grupo A1. El grupo A2 estuvo reportado sólo en México hasta fines de la década del 80.

A fines del siglo XX ocurrieron migraciones de *P. infestans* desde México, lo cual ha ayudado a incrementar la diversidad genética de las poblaciones de este patógeno en la mayoría de los continentes. Los primeros genotipos nuevos fueron detectados en Europa para proseguir en Sudamérica, África y Asia, y luego a Estados Unidos y Canadá. Éstos han llegado a predominar en los lugares detectados, siendo más agresivos (Stevenson *et al*, 2001). En Sudamérica se ha descrito el grupo A2 en Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador y Uruguay (Adler *et al*, 2002; Crissman and Lizárraga, 1999).

En las últimas dos décadas el Tizón ha retomando mucho más interés en la producción de papa en el mundo, debido a la rápida dispersión del grupo de apareamiento A2, el cual es más agresivo y resistente a metalaxil, el principal fungicida usado para su control. Previamente, sólo el grupo A1 estaba presente en el resto de los países. La presencia del grupo A2 permite la reproducción sexual del hongo, favoreciendo la sobrevivencia invernal de éste y una rápida distribución del carácter agresivo y resistente en las nuevas razas (Fry and Goodwin, 1997).

En Estados Unidos esta enfermedad se presentaba esporádicamente hasta 1992, cuando se introdujeron desde México nuevas razas y grupos de

apareamiento. Como consecuencia, el genotipo US-8 (A2) es el grupo predominante desde 1995, el cual es más agresivo y resistente a mefenoxam (Ridomil).

Cabe destacar que *P. infestans* entró a Chile por la parte sur del país proveniente de Argentina en la década del 50 (Arentsen, 1994). Sin embargo, desde entonces pocos estudios se han realizado respecto a la caracterización de la población existente en el país. En un estudio realizado en conjunto entre el INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile) y NDSU (Universidad Estatal de North Dakota, U.S.A.) para caracterizar la población de tizón tardío en el norte de Chile, se concluyó que todos los aislamientos colectados pertenecen al grupo A1/US1. Esta población está compuesta de varios patotipos de baja agresividad. Todos los aislamientos fueron altamente resistentes a mefenoxam (> a 300 ppm), debido, principalmente, al continuo uso de Ridomil como consecuencia de la constante presencia de la enfermedad favorecida por las condiciones climáticas y cultivo continuo de papa durante todo el año (Secor, 2003). Previamente, en 1979, Fernández (1979) realizó un estudio para determinar el panorama racial de *P. infestans* en la zona sur.

Sin embargo, información de caracterización de genotipos, grupos de apareamiento, patogenicidad y resistencia a fungicidas son fundamentales para evitar el desarrollo de epidemias y elaborar estrategias de manejo integrado eficientes de la enfermedad, especialmente, frente al peligro de entrada del grupo A2 desde países vecinos.

### 7.3. CONTROL INTEGRADO

Los principales aspectos a considerar en un manejo integrado son: la prevención de la enfermedad usando semillas sanas; evitar el uso de semillas que provengan de áreas donde se ha reportado la enfermedad, especialmente donde está presente el grupo de apareamiento A2; eliminar plantas voluntarias y hospederos, prácticas culturales como rotación de cultivo, revisión de cultivos, para detectar focos de la enfermedad y eliminarlos antes que sean un problema; usar pronosticadores de enfermedad para determinar cuándo y

en qué áreas la enfermedad puede desarrollarse. Finalmente, usar fungicidas cuando la enfermedad esté presente.

Para la implementación de un sistema de control integrado se deben considerar varios aspectos, donde los aspectos agronómicos del lugar de plantación, genética de las poblaciones del hongo y aspectos económicos influyen en las prácticas de manejo del cultivo. Los aspectos económicos son los más importantes en un control efectivo de la enfermedad, especialmente en países en desarrollo, ya que en ellos conviven cultivos de subsistencia y grandes superficies comerciales con altos rendimientos (Mizubuti y Forbes, 2002).

En general, los pequeños agricultores no controlan o usan mal los fungicidas para el control de tizón. Por otro lado, en países desarrollados los fungicidas son los más usados, pero es importante usarlos en forma óptima, conociendo la eficiencia de control, modo de acción y, fundamentalmente, conocer cuándo hacer la primera aplicación y la frecuencia de las aplicaciones, lo cual dependerá de la resistencia del cultivar, de las condiciones climáticas y de la presencia de inóculo (Shepers, 2002). Es más, se debe considerar que el tizón tardío es una enfermedad comunitaria, que cuando aparece en un lugar se dispersa rápidamente, afectando a pequeños y grandes agricultores (Secor, 2003). Considerando que los fungicidas son los más usados como herramientas de control, es fundamental optimizar el uso de ellos, ya que su mal uso conlleva serios problemas económicos, sociales y ambientales. Mizubuti y Forbes (2002) comentan que en países en desarrollo la investigación en epidemiología de esta enfermedad debe optimizar el uso de fungicidas sin comprometer las utilidades y acompañado de una fuerte capacitación en manejo integrado.

## **7.4. SISTEMAS DE PRONÓSTICO**

Los pronosticadores, desarrollados en la Universidad de Pennsylvania-USA, usan algunas variables meteorológicas para predecir las condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad. Éstas se basan en dos modelos: uso de HR y temperatura para generar “valores de severidad”. Cuando este

valor alcanza 18, las condiciones climáticas son favorables para que el tizón tardío se desarrolle en los próximos 7 a 14 días “si el inóculo está presente”. El Segundo modelo está basado en “días favorables”. Un día es favorable cuando la temperatura promedio de los 5 cinco días previos ha sido menor a 25°C y las precipitaciones de los 10 días anteriores han sido al menos de 30 mm. Cuando se acumulan 10 consecutivos “días favorables” se dice que la enfermedad ocurrirá en los próximos 8 a 14 días, siempre que el inóculo esté presente.

Se han desarrollado programas computacionales que usan estos dos modelos para predecir la ocurrencia de la enfermedad. Este sistema permite dar recomendaciones a los agricultores para hacer o no aplicaciones de fungicidas, de informar dónde la enfermedad ha sido reportada, y de informar a los agricultores si las condiciones en una cierta área son favorables o no para la enfermedad. El uso de pronosticadores permite un mejor manejo de la enfermedad y un uso más eficientes de fungicidas disponibles para su control (Secor, 2003).

Otro modelo existente, desarrollado y aplicado en países de Europa, es NEGFY el que está basado en un modelo de “prognosis negativa” desarrollado por Ullrich y Schrodter (1966). Éste permite obtener la “primera alarma” en base a datos meteorológicos (humedad relativa, precipitaciones y temperatura) calculando un indicador denominado “valor de riesgo de tizón”. En NEGFY, una vez que se ha dado la primera alarma se utiliza el modelo de Fry *et al* (1983), que permite generar las necesidades de aplicación de acuerdo a la duración de la dosis de fungicida aplicado y el efecto de la enfermedad en el grado de resistencia del hospedero.

Los sistemas computacionales más ampliamente usados se basan en los estudios de Hyre (1954) y Wallin (1962). Estos sistemas utilizaban información de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas, y los primeros síntomas de la enfermedad. Con el tiempo estos programas se han ido perfeccionando, llegando a desarrollar softwares capaces de predecir las condiciones predisponentes para el desarrollo de la enfermedad y sus recomendaciones de manejo (Stevenson, 1997; Krause *et al*, 1975). Estos programas han sido usados ampliamente como complemento a los Programas



de Manejo Integrado de Plagas (IPM), reconociendo las necesidades técnicas de manejo más precisas, la necesidad de reducir el uso de pesticidas, mejorar la calidad de los alimentos, mejorar la calidad ambiental, aumentar los conocimientos de las enfermedades problemas y su etiología, y mejorar la economía del cultivo (Binsteine and Turka, 2002; Fry *et al*, 2002; Myint *et al*, 2001; Chow and Bernard, 1999; Sedegui *et al*, 1999; Johnson *et al*, 1998; Stevenson, 1994).

Las condiciones climáticas de la región sur son muy variables año en año, lo que ha llevado a una inseguridad en el manejo de esta enfermedad en cuanto a oportunidad de aplicación, teniendo como consecuencia el control inadecuado o el exceso en el uso de pesticidas. Además, potencialmente existe el peligro de desarrollo de resistencia del hongo a los fungicidas más importantes si éstos son usados inadecuadamente. También existe el peligro del ingreso del grupo de apareamiento A2 de *P. infestans*, ya que algunos de los países vecinos ya lo tienen (Adler *et al*, 2002). Debemos estar preparados para ese momento con estrategias de manejo de la enfermedad adecuadas para evitar un ataque catastrófico, como ha ocurrido en otros países. Una de las técnicas es el uso de pronosticadores. Los sistemas de pronóstico para predecir el ataque de tizón se han estudiado desde hace algunas décadas en los Estados Unidos y otros países.

En este contexto, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, en asociación con una serie de entidades públicas y privadas, está llevando a cabo el proyecto "Uso de pronosticadores para el desarrollo de estrategias de manejo integrado del tizón tardío de la papa en la zona sur de Chile" (código FIA-PI-C-2003-1-A-17), financiado por la Fundación para la Innovación Agraria. Éste pretende dotar al rubro papa de tecnologías modernas para la predicción de condiciones para el ataque de enfermedades, en particular *P. infestans*. El desarrollo de esta tecnología y su validación permitirá, en el mediano plazo, dotar a los productores de papa del sur de Chile de un sistema de información para apoyar la toma de decisiones respecto a la aplicación de pesticidas y al manejo integrado de esta enfermedad, para minimizar el daño en el cultivo.

De esta manera, el proyecto se enmarca dentro de los siguientes desafíos:

- La necesidad de incrementar la competitividad del rubro papa mediante la incorporación creciente de tecnologías que permitan aumentar la productividad y la calidad sanitaria del producto.
- Reducir los costos de producción mediante el manejo integrado de plagas y enfermedades.
- Minimizar las pérdidas producto del ataque de enfermedades.

El desarrollo y validación de la tecnología propuesta en este proyecto pondrá a nuestro país como vanguardia en el uso de pronosticadores para el control y manejo de enfermedades en América Latina, acortando la brecha tecnológica existente en el cultivo con los países desarrollados. La experiencia lograda de este proyecto podría ampliarse aplicando los sistemas de pronosticadores a otras enfermedades de importancia agrícola para el país.

En este proyecto se están evaluando algunos modelos de predicción descritos en el programa CASTOR 2.0. Este programa contiene 9 modelos: Hyre (1954); Smith (1956), Wallin (1962), Ullrich and Schrodter (1966), BLITECAST (Krause *et al*, 1975); SIMCAST (Fry *et al*, 1983), Forsund (1983), Winstel (1993) y NegFry (Hansen *et al*, 1995).

Igualmente, el proyecto contempla la evaluación del modelo DACOM Plant Plus. Éste es un modelo desarrollado en Holanda como un sistema de apoyo a las decisiones que ayuda a determinar el momento de aplicación de un fungicida basado en modelos del ciclo de vida del hongo y pronóstico del tiempo. Para esto considera 2 modelos:

- Partes no protegidas del cultivo, tomando el crecimiento de nuevas hojas y la degradación y lavado del pesticida.
- Eventos de infección de la enfermedad, evaluando la formación de esporas en las hojas infectadas, la dispersión de las esporas en el aire y la germinación de esporas y penetración en hojas no protegidas. Así, la combinación de área de la hoja no protegida y los eventos de infección en los tratamientos recomendados indican el riesgo de infección ([www.plan-net.com/ppo.htm](http://www.plan-net.com/ppo.htm)).

Los resultados preliminares señalan la conveniencia del uso de pronosticadores puesto que es posible obtener rendimientos similares en cultivos con

aplicaciones a calendario fijo, comparados con cultivos en que se utilizó un sistema de alerta temprana. Incluso, en ocasiones es posible disminuir las aplicaciones de tal forma que se impacta positivamente en los costos de producción y el medio ambiente.

## 7.5. LITERATURA CITADA

Acuña, B. y H. Torres. 2000. El Tizón Tardío de la Papa. Informativo N° 22. INIA-Remehue.

Adler, N., G. Chacón, G. Forbes and W. Flier. 2002. *Phytophthora infestans* sensu lato in South America population subtracting through host specificity. In: Late Blight: managing the global threat. Proceeding of the Global Initiative on late Blight Conference. July 11-13. Hamburgo. Germany.

Agrios, G.N. 1997. Plant Pathology. Fourth Edition. Academic Press. San Diego, Ca. USA. 635pp.

Alexopoulos, C.J., C.W. Mims and M. Blackwell. 1996. Introductory Mycology. Fourth Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York. USA. 868 pp.

Arentsen, S. 1994. Fitopatología Chilena, Historia y Desarrollo. Conference at VII Meeting of the Latinoamerican Phytopathological Society. Santiago. Chile.

Bimstein, G and I. Turka. 2002. Efficiency of potato Late Blight control models. Proceedings in Agronomy N° 4 p. 35-39 (Abstract).

Chow, T. and G. Bernard. 1999. A versatile, fully automated, real-time potato Late Blight alert unit. Computers and Electronics in Agriculture 23:55-69 (Abstract).

Crissman, L. and C. Lizárraga. 1999. Late Blight: a threat to global food security. Vol I. Proceeding of the Global Initiative on Late Blight Conference. March 16-19. Quito, Ecuador. 157 pp.

Dick, M.W. 1995. The straminipilous fungi: A new classification for the biflagellate fungi and their uniflagellate relatives with particular reference to Lagenidiaceae fungi. CAB Int Mycol. Pap. 168.

Erwin, D. and O. Ribeiro. 1996. *Phytophthora Disease Worldwide*. APS Press. St. Paul, Minnesota, USA. 562 pp.

FAO. 1995. FAO Statistical database, Agriculture. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). URL: [www://fao.org](http://www.fao.org)

Fernández, C. 1979. Variación del panorama racial de *Phytophthora infestans* (Montt.) de Bary en el sur de Chile desde 1963 a 1977. *Agricultura Técnica* 39:7-17.

Fundación Chile. 2001. Cadenas agroalimentarias, Papas. URL: <http://www.funch.cl/fc/papas>.

Forsund, E. 1983. Late blight forecasting in Norway 1957-1980. *EPPO Bulletin* 13(2):255-258.

Fry, W. and S. Goodwin. 1997. Re-emergence of potato and tomato Late Blight in the United States. *Plant Disease* 81:1349-1357.

Fry, W.E., A.E. Apple, and J.A Bruhn. 1983. Evaluation of potato late blight forecasts modified to incorporate host resistance and fungicide weathering. *Phytopathology* 73:1054-1059.

Grunwald, N.J., O.A. Rubio-Covarrubias, and W.E. Fry. 2000. Potato late blight management in the Toluca Valley: Forecast and resistant cultivars. *Plant disease* 84(4):410-416.

Hansen, J.G., B. Andersson and A. Hermansen. 1995. NEGFY, a system for scheduling chemical control of late blight in potatoes. Pages 201-208 in *Phytophthora infestans* 150: Proceeding. L.J. Dowley, E. Bannon, L.R. Cooke, T. Keane, and E. Sullivan, eds. Dublin, Ireland.

Hooker, W.J. (Ed.). 1980. *Compendio de Enfermedades de la Papa*. APS Press. St. Paul, MN. EE.UU. 166pp.

Hyre, R.A. 1954. Three methods of forecasting late blight of potato and tomato in northeastern United States. *American Potato Journal* 32: 362-371.

Hyre, R.A. 1954. Progress in forecasting late blight of potato and tomato. *Plant disease Report*: 245-253.

INDAP, 2001. Papas: Informe de mercado, elaborado por ODEPA para INDAP. URL: [www://sitec.cl/boletines/papa](http://sitec.cl/boletines/papa).

INE. 1997. VI Censo nacional Agropecuario, Resultados preliminares. Instituto de Nacional de Estadísticas, Chile.

Johnson, D.; J. Alldredge and P. Hamm. 1998. Expansion of potato Late Blight forecasting models for the Columbia Basin of Washington and Oregon. *Plant Disease* 82:642-645 (Abstract).

Juárez, H.S., L.M. Avila and R Hijmans. 2001. Late blight forecasting models and the CASTOR 2.0 software. Pages in Proceeding of the International Workshop on Complementig Resistance to Late Blight (*Phytophthora infestans*) in the Andes. February 13-16, 2001. Cochabamba, Bolivia. GILB Latin Amewrican Workshops 1. E.N. Fernandez-Northcote, ed. International Potato Center, Lima. Perú.

Krause, R.A., L.B. Massie and A. Hyre. 1975. Blitecast: a computerized forecast of potato late blight. *Plant Disease Report* 59: 95-98.

Myint, M.; T. Su and K. Win. 2001. Effect of different fungicides application based on disease forecasting in controlling of potato late blight in Myanmar. International Workshop on Potato late blight of the ESEAALG, GILB, NAAES and KNU. October 15-19. National Alpine Agricultural Research Station, Pyongchang, Republic of Korea.

Mizubuti, E. and G. Forbes. 2002. Potato late blight IPM in the developing countries. In: Late Blight: managing the global threat. Proceeding of the Global Initiative on late Blight Conference. July 11-13. Hamburgo. Germany.

ODEPA (Chile). 2005. Estadísticas macrosectoriales y productivas. [en línea] <http://www.odepa.gob.cl>. [consulta: 17-07-06].

Rojas, J., M. Castro, O. Nail, M. Gutiérrez y R. Monje. 2000. Diagnóstico, problemas y sugerencias para el desarrollo del cultivo de papa en la Décima región de Chile. Ministerio de Agricultura, Chile.

Schepers, H.T. 2002. Potato late blight IPM in the industrialized countries. In: Late Blight: managing the global threat. Proceeding of the Global Initiative on late Blight Conference. July 11-13. Hamburgo. Germany.

Secor, G. A. 2003. Estrategias de manejo integrado de Tizón tardío. En: Seminario "Manejo Integrado de Enfermedades en el Cultivo de la Papa" 3 de Abril 2003. INIA-Carillanca. Temuco.

Sedegui, M.; R. Carroll; A. Morehart; A. Arifi; R. Lakhdar and A. Belarbi. 1997. Forecasting potato Late Blight in Morocco. Al-Awamia, Publ. 1999, N° 97, p. 9-15 (Abstract).

Servicio Agrícola y Ganadero. 2000. Enfermedades y Plagas de la Papa en el Sur de Chile. Proyecto "Control Enfermedades de la Papa". SAG, Fondo Nacional de Desarrollo Regional. Décima Región de los Lagos, Chile.

Stevenson, W. 1997. Integrated crop management decision-making for the grower using Wisdom Software. Proceeding of the 32nd Annual Montana Seed Potato Seminar. Montana, USA.

Stevenson, W., D. Curwen, K.A. Kelling, L.K. Wyman, L.K. Binning and T.R. Connel. 1994. Wisconsin's IPM Program for potato: The development process. Hort Technology 4: 90-95.

Stevenson, W., R Loria, G. Franc and D. Weingartner. 2001. Compendium of Potato Diseases. Second Edition. APS Press. St. Paul Minnesota. USA. 106pp.

Ullrich, J. and H. Schrodter. 1966. Das problem der vorhersage des aufretens der kartoffelkrautfaule (*Phytophthora infestans*) und die moglichkeit seiner losung durch eine negativprognose. Nachrichtenblatt dt. Pflanzenschutzdienst (Braunschweig) 18:33-40.

Wallin, J.R. 1962. Summary of recent progress in predicting late blight epidemics in United States and Canada. Am. Potato J. 39: 306-312.

Winstel, K. 1993. Kraut- und Knollenfaule der Kartoffel: eine neue Prognosemöglichkeit- sowie Bekämpfungsstrategien. Mededelingen van de Faculteit voor Landbouwwetenschappen van de Rijksuniversiteit Gent (Belgium) 58(3b): 1477-1483.

Zentmyer, G. 1983. The world of Phytophthora. En: Erwin, D, S. Bartnicki-Garcia and P. Tsao (Ed). Phytophthora its Biology, Taxonomy, Ecology and Pathology. APS Press. St. Paul, Minnesota, USA. 392 pp.

## 7.6. ANEXOS

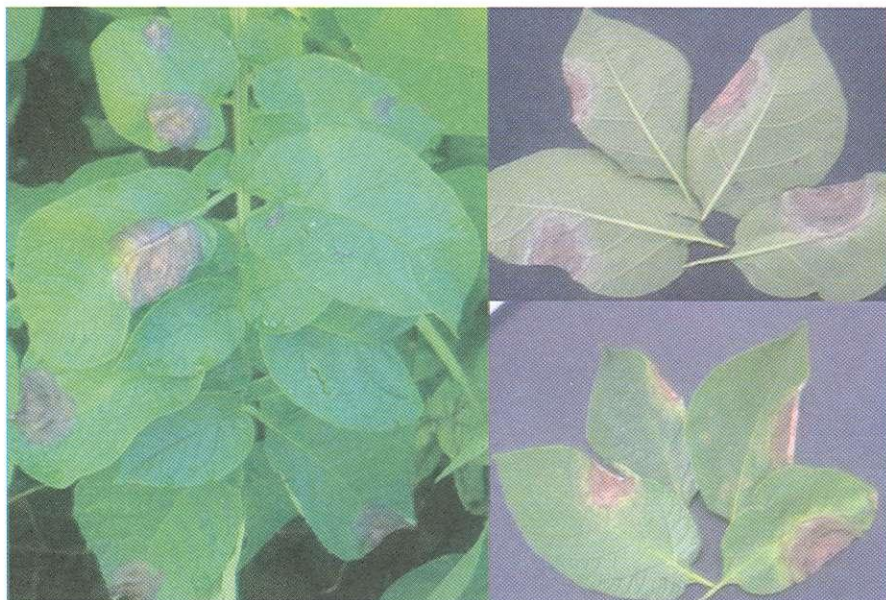


Foto 7.1. Síntomas de Tizón tardío en hojas de papa.

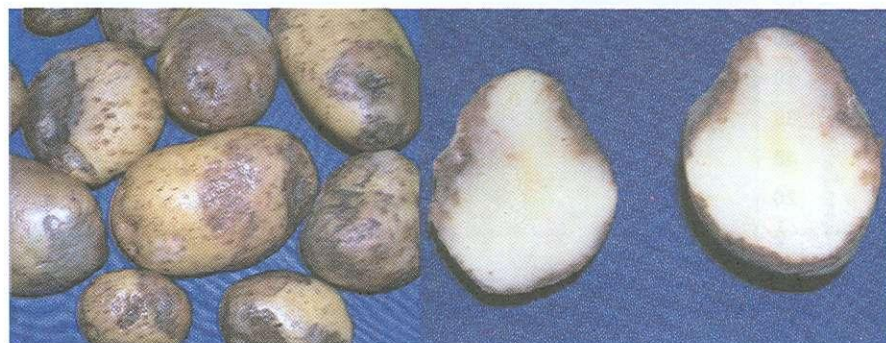


Foto 7.2. Síntomas de tizón tardío en tubérculos de papa.



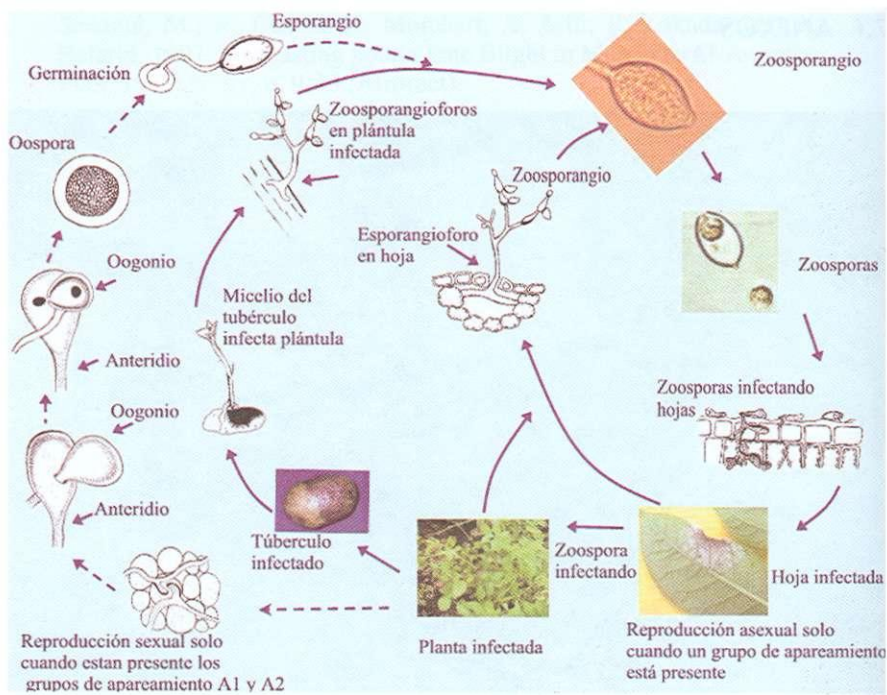


Figura 7.1. Ciclo del tizón tardío de la papa.

Fuente: Agrios Ed. II, p. 222, modificado.

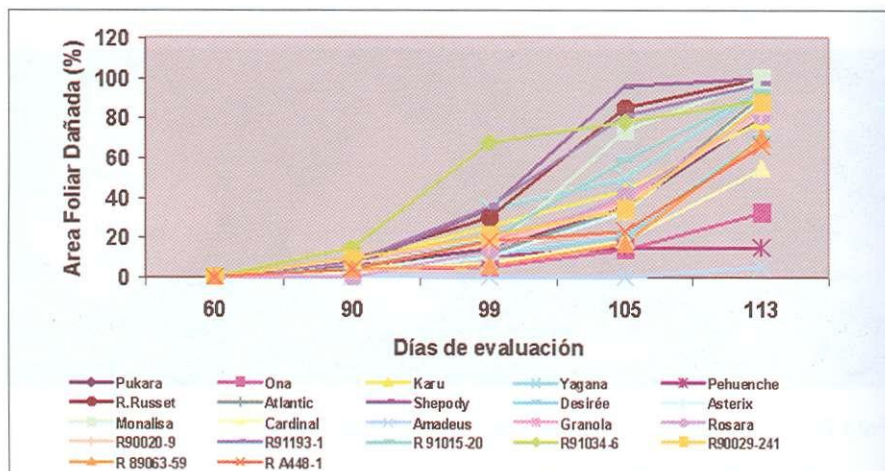


Figura 7.2. Porcentaje de follaje dañado por tizón tardío en 22 cultivares y líneas avanzadas de papa. Evaluación de resistencia. INIA Remehue 2004-05.



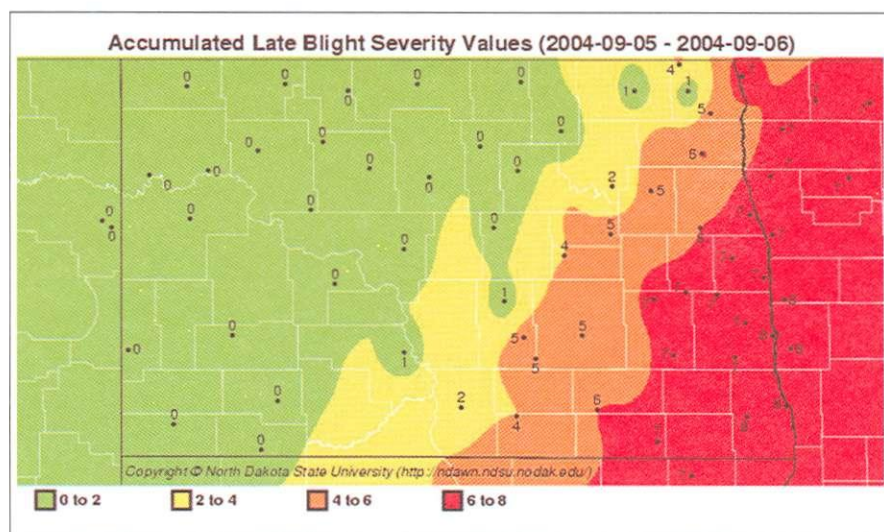


Figura 7.3. Mapa de colores que muestra los grados de severidad acumulados hasta septiembre de la temporada 2004 en diferentes localidades del Estado de Dakota del Norte, Estados Unidos. Sistema NDAWN.

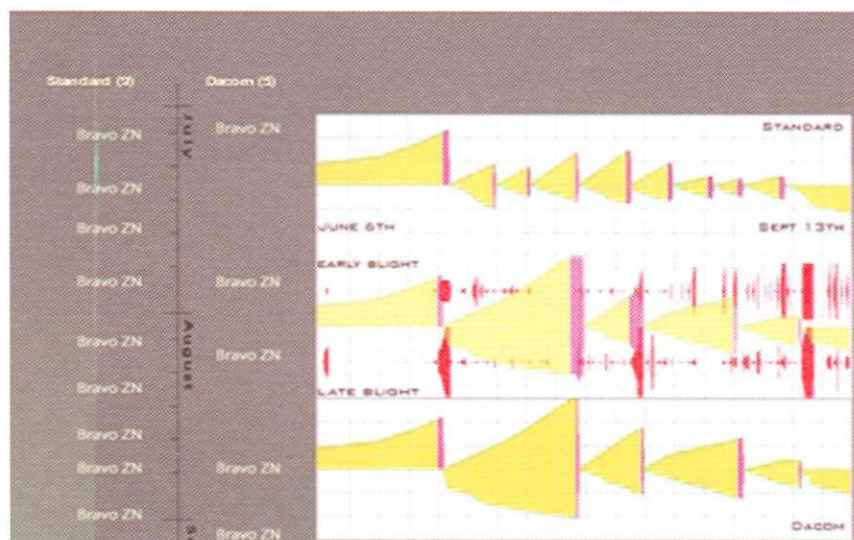


Figura 7.4. Comparación de la cantidad de aplicaciones de fungicidas realizada en un sistema de manejo estándar del tizón tardío y el sistema de alarma Plant Plus Online, DACOM, en la temporada 2004 en el Estado de Dakota del Norte, Estados Unidos.

## CAPÍTULO 8

### **SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA EN REMOLACHA (BETA VULGARIS) EN ESTADOS UNIDOS**

*Autores*

**Gary Secor / Viviana Rivera**  
Ph.D., Professor. North Dakota  
State University, U.S.A.  
gary.secor@ndsu.nodak.edu

**Viviana Rivera**  
Mg. Sc North Dakota State  
University, U.S.A.  
viviana.rivera@ndsu.nodak.edu

*El presente texto corresponde a la traducción de la exposición del Doctor Gary Secor en el Curso de Agrometeorología Básica Utilizando Estaciones Meteorológicas Automáticas, realizado en INIA Quilamapu, Chillán, del 13 al 15 de septiembre de 2005.*

**E**n los Estados Unidos el área cultivada con remolacha (*Beta vulgaris* L.), en la temporada agrícola 2004-2005, alcanzó del orden de los 1.3 millones de acres (526.000 ha). La zona de mayor producción se concentra en los estados de North Dakota y Minnesota, precisamente, en el Valle del Río Rojo (Figura 8.1), donde imperan suelos profundos de origen glacial, con cualidades especiales para el desarrollo del cultivo, el cual se desarrolla sin riego (secano), abarcando en esta zona, más del 50%, con 739.638 Acres (299.000 ha.). La producción total, entre estos estados está alrededor de los 12-14 millones de toneladas de remolacha, todo bajo contrato, traducándose esto en un movimiento aproximado de 3 billones de dólares.

En el área destacan básicamente 3 empresas, cuya superficie sembrada alcanza:

- American Crystal Sugar Company: 497.889 acres (201.489 ha).
- Minn-Dak Farmers Cooperative: 108.000 acres (43.706 ha).
- Southerm Minnesota Beet Sugar Cooperative: 118.749 acres (48.056 ha).
- Además de 15.000 acres (6.070 ha) en el este de North Dakota.

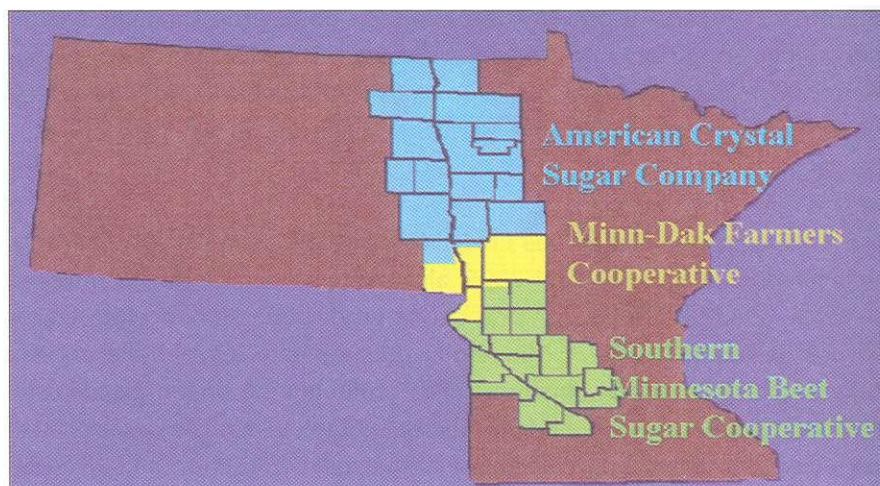


Figura 8.1. Mapa de ubicación de la principal área de producción de remolacha y empresas de la zona.

Una de las enfermedades más frecuente en remolacha es la causada por *Cercospora beticola*, aunque también se presentan enfermedades causadas por *Rhizoctonia*, *Erwinia*, *Rhizomania*, *Aphanomyces*, etc. En este apartado se expondrá la experiencia con pronosticadores de *C. beticola*, el cual causa grandes problemas en el desarrollo del cultivo en los EE.UU. Este hongo ataca exclusivamente a las especies del género *Beta*, siendo muy sensible al ataque la remolacha azucarera, causando la Cercosporiosis o Viruela de la remolacha. Es así como, desde 1981 esta enfermedad es considerada importante en los EE.UU. y en la actualidad endémica en este país.

Los síntomas aparecen como pequeños puntos rojizos en las hojas que, al desarrollarse, dan origen a manchas redondas, deprimidas y rodeadas por un halo pardo rojizo. El manchado produce en las plantas una reducción del área foliar y, por lo tanto, una disminución de la capacidad fotosintética de la planta. Cuando el ataque es severo las hojas dañadas pueden deshidratarse y causar una baja en el rendimiento de la remolacha. Con 3% de cercosporiosis se tienen pérdidas económicas tanto de rendimiento como contenido de azúcar (Foto 8.1). La enfermedad puede afectar toda la planta, incluyendo las semillas. Por lo tanto, en cultivos destinados a la producción de semillas, afecta



su capacidad germinativa, existiendo el riesgo de transmitir la enfermedad. Pero la importancia de esta fuente de inóculo en la epidemiología de la enfermedad es mínima. Su diseminación puede efectuarse a través del agua, el viento, semillas contaminadas y probablemente por algunos insectos. El desarrollo de la enfermedad se ve favorecido con temperaturas cálidas y alta humedad relativa. El hongo sobrevive sobre semillas infectadas, residuos de cultivos enfermos y algunas malezas hospederas. Para el control de esta enfermedad se recomienda establecer cultivares resistentes a la enfermedad, eliminar todos los residuos infectados y malezas hospederas, establecer rotaciones, durante 2 a 3 años, con cultivos libres de esta enfermedad y realizar un adecuado manejo de fungicidas.



Foto 8.1. Lámina foliar con daño característico (izquierda) y ataque severo, similar a un quemado de la hoja (derecha) ocasionado por *C. beticola*.

Dentro de las medidas de control de la enfermedad está la aplicación de productos químicos. Estas aplicaciones en remolacha son generalmente entre 3 y 4, y son realizadas en la segunda mitad del desarrollo del cultivo, ya que es en este periodo donde se presentan las condiciones óptimas para su formación. En este punto encontramos una serie de productos comerciales que en la actualidad son utilizados. Éstos son:

- Tin (TPTH)
- Topsin (Thiophanato methyl).
- Eminent (1999) (Tetraconazole).

- Headline (2003) (Pyraclostrobin).
- Gem (2004) (Trifloxystrobin).

Debido a que esta enfermedad se considera de climas cálidos, alta humedad relativa y altas temperaturas, las aplicaciones de fungicidas dependen de:

- La temperatura durante el día varíe entre 25-30° C.
- La temperatura durante la noche sea >16° C.
- La Humedad relativa sea >90% o existe agua libre sobre las hojas.  
Obs.: Por lo anterior es que es considerada como una enfermedad de climas calientes, alta temperatura y alta HR.

Dado que el impacto de esta enfermedad es muy alto, la Universidad Estatal de North Dakota, desarrolló un sistema de alerta temprana en base a una red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA`s). El modelo usado para la predicción de aplicaciones fue desarrollado por Shane y Teng, entre 1983-1985, en North Dakota-Minnesota. Éste se basa en el uso de Valores de Infección Diaria (DIV`s), que corresponden a valores calculados según si están o no presentes las condiciones climáticas necesarias para el desarrollo de la enfermedad, correlacionando las horas del día en que la humedad relativa es >90% y la temperatura del aire varía entre 16-35°C. (60-95° F.). Los DIV`s se calculan cada 2 días siendo el máximo acumulado durante este período de 14 DIV`s. Así, en dos días de acumulación podemos decir que:

- 0-6 DIV: Baja probabilidad de infección.
- 7-14 DIV: Alta probabilidad de infección.

El desarrollo de este modelo de DIV`s se produjo a mediados de los 80`s. Fue y es muy útil para predecir enfermedades, aunque no es completamente exacto, debido a que no considera, en su totalidad, las variables que determinan la aparición de la enfermedad. En el caso de *Cercospora beticola* es importante considerar otros factores para su predicción, tales como:

- Revisar de manera periódica los predios para detectar, de manera precisa, los primeros síntomas de la enfermedad.

- Momento en cual se produce el cierre de las hileras del cultivo.
- Presencia o no de uso de variedades resistentes.
- Conocer Valores de Infección acumuladas diaria y semanales.

En los últimos años se han realizado algunas modificaciones al modelo de cálculo de DIV`s, los cuales son:

- Modificación de ubicación de sensores de HR. Normalmente se ubicaban dentro del cultivo, pero debido a las labores realizadas se producían daños. Así mediante algunos estudios se determinó que la ubicación del sensor a 1.5 m de altura sobre el nivel del suelo presentaba una correlación con un  $r^2$  de 0.98.
- Modificación de HR límite. En principio para el cálculo de DIV`s se utilizaba una humedad relativa limite de 90%, con los años varió a 87% hasta llegar en la actualidad a 85%.
- Modificación de horarios de recepción de datos. Normalmente se recibían los datos diarios estimados desde media noche a la media noche siguiente. En la actualidad se suman los de medio día, para poder calcular así las condiciones nocturnas de humedad y temperatura.

## 8.1. SITIO WEB DE “NDAWN CENTER”

El sitio Web desarrollado consta de una presentación muy amistosa y fácil de utilizar por los usuarios, permitiendo así, sacar el máximo provecho a la información presente en éste como: días grado, estado de crecimiento, valores de infección de *Cercospora beticola* (mapa o tabla), etc. (Figura 8.2).

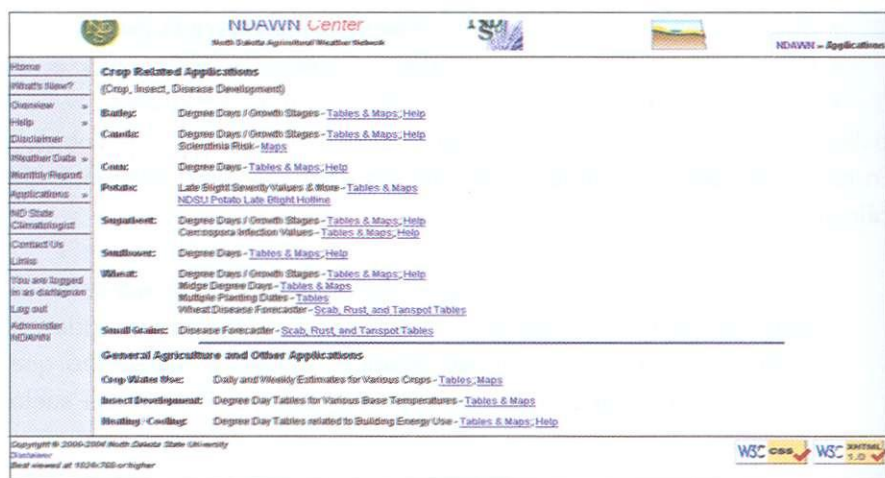


Figura 8.2. Sitio Web desarrollado por la Universidad de North Dakota y sus distintas aplicaciones.

Una de las formas de presentación de los Valores de Infección es en tabla o mapa (Figuras 8.3 y 8.4). En el último caso se puede observar fácilmente a través de diferentes colores las zonas donde se encuentran las mayores acumulaciones y, por lo tanto, guían al agricultor en la toma de decisiones para la realización de aplicaciones. Así, el color verde significa bajo riesgo, el amarillo riesgo moderado y el rojo muy alto riesgo de desarrollo de la enfermedad. Además, se puede seleccionar una determinada estación para ver sus datos en detalle.



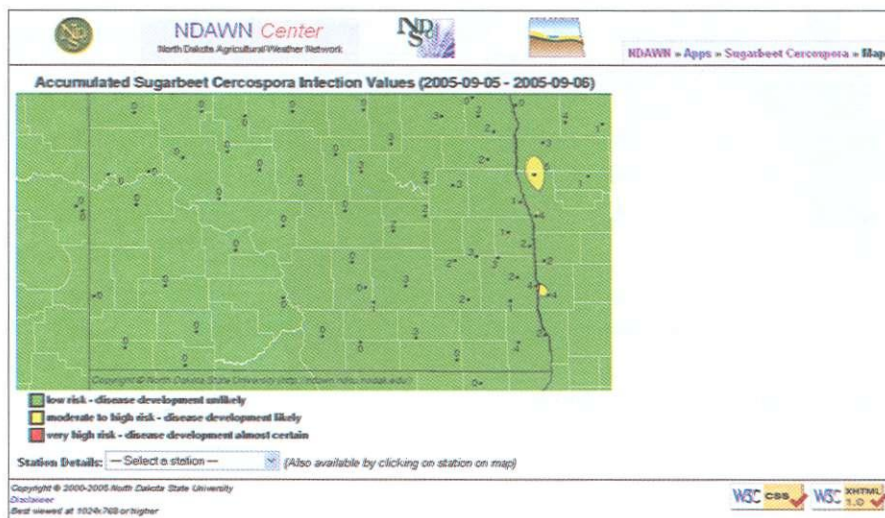


Figura 8.3. Mapa con DIV's acumulado de 2 días.

En la figura anterior se observa que en ninguna zona es necesaria realizar aplicaciones. Para determinar el momento preciso para una aplicación de fungicidas es necesario revisar los DIV's acumulados al menos cada 2 días, logrando así el control efectivo de la enfermedad.

Otra alternativa posible por el sitio Web es la visualización de la acumulación de DIV's de toda una determinada temporada (Figura 8.4), aunque esto no serviría de forma práctica. Para tal efecto es que se hace necesario acudir a esta información, idealmente cada 2 días, y así poder determinar el momento preciso para una aplicación, logrando con esto el control efectivo de la enfermedad.

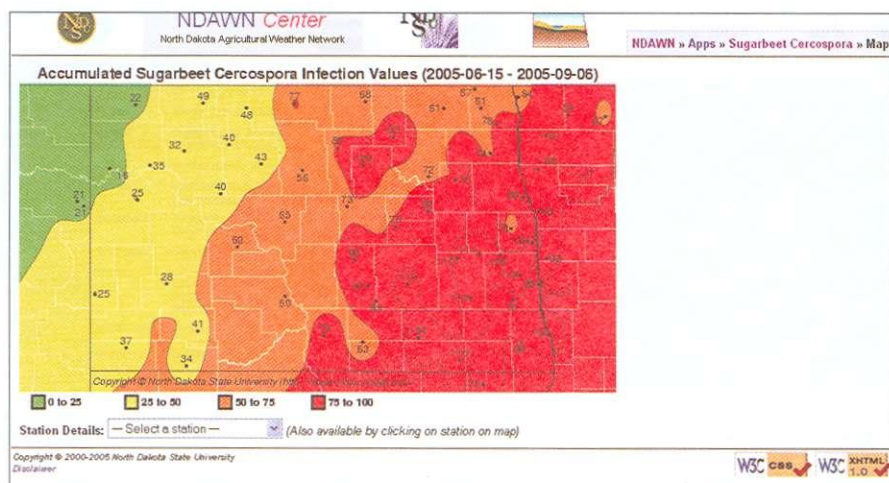


Figura 8.4. Mapa de acumulación total por temporada de DIV's, en el cual se observa claramente las zonas donde se presentaron las condiciones ideales para la enfermedad, correspondiendo a los alrededores del Río Rojo.

Actualmente existen autores, como Wolf y Verreet (2005), que usan el mismo concepto de DIV's, pero de manera contraria; es decir, a diferencia del caso anterior, que determina cuando se dan las condiciones para el desarrollo de la enfermedad, éste estima cuando no se dan las mismas condiciones, así:

- DIV <7, para variedades susceptibles.
- DIV <12, para variedades resistentes.

El número de aplicaciones de un determinado fungicida, por temporada, es variable en la zona de North Dakota. Un número mayor del necesario se traduce, además del obvio aumento en los costos, en problemas de resistencia del hongo a los fungicidas utilizados, contaminación ambiental, etc. Los factores que determinan la cantidad de aplicaciones durante el desarrollo del cultivo son:

- Presión de la enfermedad.
- Condiciones Climáticas.
- Acumulación de Valores de Infección en una determinada zona.

Así, el número de aplicaciones contra *C. beticola* históricamente ha variado, observándose que entre los años 1981-1984 era de 4, presentándose una leve baja hasta el año 1988, debido a los llamados años secos. Luego, desde la implementación del modelo DIV's (1985) hubo un leve incremento en la cantidad de aplicaciones, hasta la aparición de nuevos productos químicos, por ejemplo, Eminent, en el año 1999, Headline en el 2003 y en último lugar, Gem en 2004 (Figura 8.5).

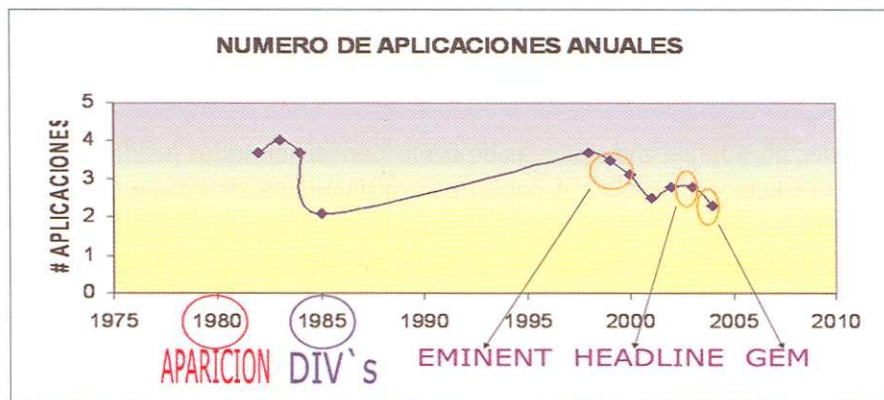


Figura 8.5. Número de aplicaciones de fungicidas por año, año de aparición de *C. beticola*, implementación de DIV's e implementación de nuevos productos comerciales.

Existen motivos muy importantes para pronosticar enfermedades, como el control de la enfermedad y el manejo de la resistencia a los fungicidas. Así, además de trabajar con los DIV's, se tomó como referencia de buen manejo de fungicidas, el sistema FRAC (Comisión de Acción de Resistencia a Fungicidas), que es una comisión europea que regula la resistencia a éstos. Lo anterior, porque si se usa por un periodo muy largo un determinado producto, esto puede traducirse en un cambio en la susceptibilidad del patógeno hacia el producto, desarrollando algún grado de resistencia, lo cual afecta directamente las alternativas de control que se disponen.

Los cambios de susceptibilidad, es decir, la habilidad del patógeno de resistir o no el efecto del producto, es muy importante en el cultivo de la remolacha, existiendo variados términos referente a esto: sensibilidad reducida, tolerancia

y resistencia, según el grado de susceptibilidad. En base a esto es que se realizó un estudio, financiado por la Industria Azucarera y la Universidad de North Dakota, con los siguientes objetivos:

- Medir el grado de tolerancia a los productos Tin y Topsin.
- Monitorear cambios de susceptibilidad a tres nuevos productos; Eminent, Headline y Gem.

## 8.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron hojas con síntomas de cercosporiosis en todos los distritos de North Dakota y Minnesota. A partir de los aislamientos de estas muestras se determinó el grado de tolerancia y resistencia del hongo a los productos Tin y Topsin. Para ello se puso una suspensión de 100 esporas/ml en una placa con el medio agar agua. Se utilizó una mezcla compuesta de esporas de todos los aislamientos obtenidos. Se evaluó el porcentaje de germinación de las esporas en una concentración de 1 ppm de Tin y 5 ppm de Topsin. Con el objetivo de monitorear los cambios de susceptibilidad del hongo a los fungicidas Eminent, Headline y Gem, se determinó el EC50 (Concentración efectiva en la que el producto reduce en un 50% el crecimiento del hongo) a concentraciones de 0,001-1,0 ppm del fungicida Eminent y concentraciones de 0,001-1,0 ppm + 100 ppm de Sham de los fungicidas Headline y Gem, utilizando un cultivo puro mediante espora simple en agar agua.

## 8.3. RESULTADOS

Fue así como se determinó la susceptibilidad de aislamientos de *Cercospora beticola* al producto Tin (TPTH), con muestras colectadas en North Dakota y Minnesota en el año 2004, bajo concentraciones de 1,0 ppm, mediante mediciones del % de germinación de la espora. La totalidad de aislamientos testeados fueron 924 y se observó que casi todos (98.9%) fueron sensibles a Tin 1,0 ppm (Figura 8.6), lo que demuestra que la tolerancia de años atrás se ha ido perdiendo, lo cual permitiría nuevamente su uso.



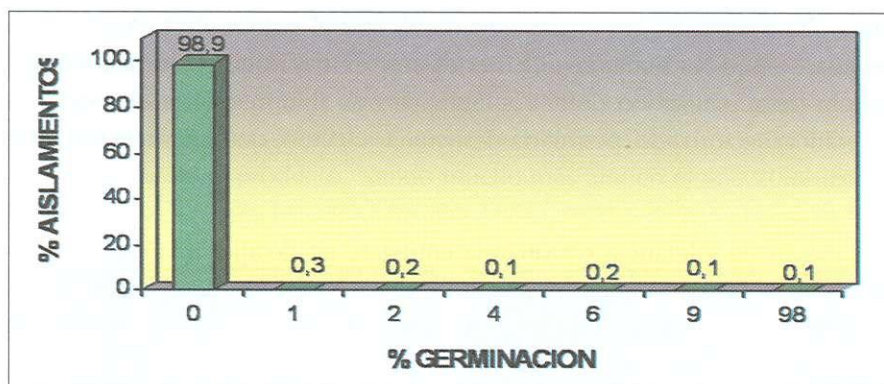


Figura 8.6. Susceptibilidad de aislamientos de *C. beticola* a Tin 1,0 ppm.

También se determinó la sensibilidad de aislaciones de *Cercospora beticola* a Tin colectadas en diferentes distritos en North Dakota y Minnesota, desde el año 2001 al 2004 (Figura 8.7). En ese ensayo se estableció un aumento de la susceptibilidad del hongo hacia el producto año a año.

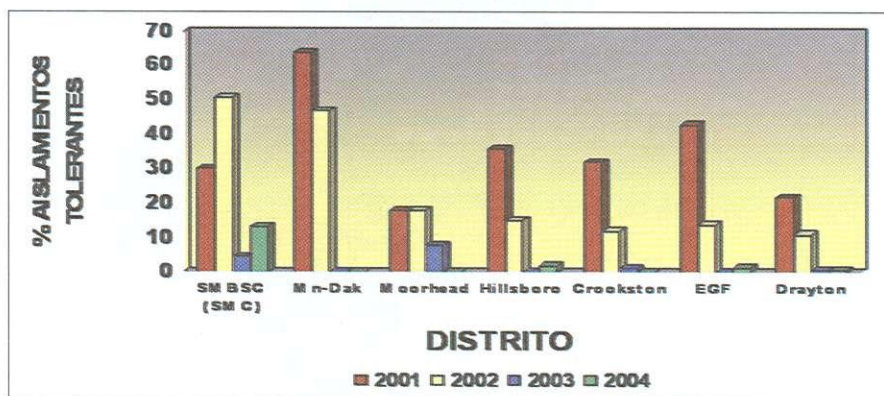


Figura 8.7. Susceptibilidad de aislaciones de *Cercospora beticola* colectada en diferentes distritos, a Tin entre los años 2001 y 2004.

Otro objetivo del presente trabajo fue construir una base de datos que permitiera visualizar en forma gráfica un mapa sectorizado, donde se pudiera observar, fácilmente, los distintos grados de tolerancia a un determinado producto por

parte del hongo. Así, de manera conjunta con el sistema NDAWN y estos mapas, se pudiera tomar las decisiones correctas, ya que el sistema entrega mapas de acumulación de DIV's. Sumada esta información a un mapa de tolerancia sectorizado, permitiría determinar cuándo, qué producto y dónde aplicarlo.

Los mapas de tolerancia sectorizada entregan, en detalle, información que se visualiza en un mapa con una serie de colores, que permiten distinguir fácilmente las zonas geográficas y los grados de susceptibilidad del hongo (Figura 8.8).

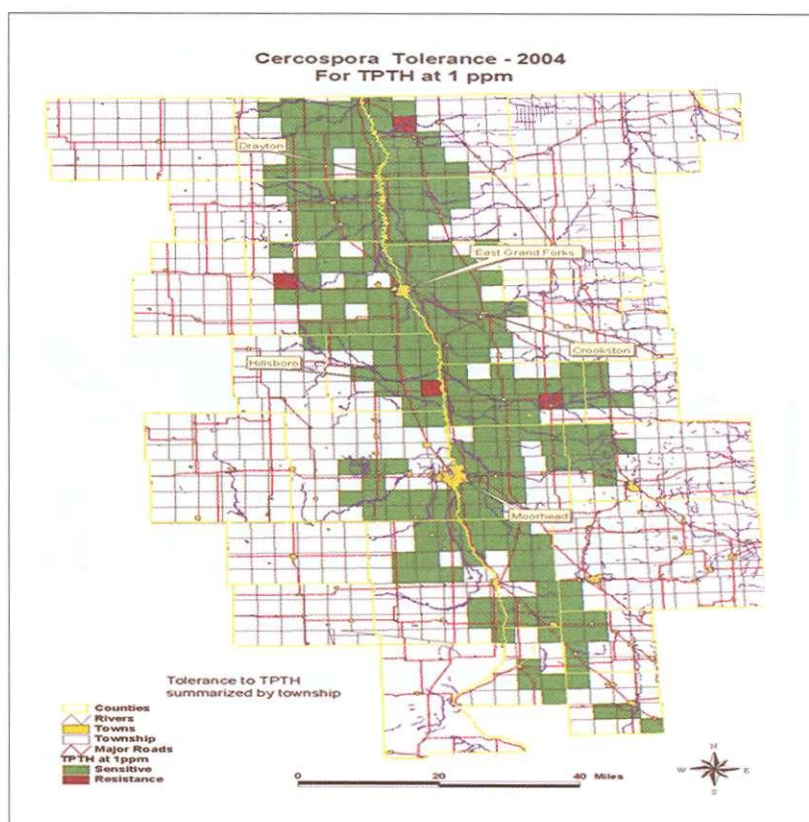


Figura 8.8. Mapa de tolerancia sectorizada de *C. beticola* a Tin 1,0 ppm en el año 2004.

Pero todo esto no sólo es observado en laboratorio, sino también en terreno. Fue así como se realizó un ensayo en que se compararon los efectos de 4 aplicaciones por temporada de Tin en el año 1998, con las realizadas el año 2004. En él se ven claramente las diferencias en los cambios de susceptibilidad del hongo hacia el producto, siendo mucho más alta en el año 2004 (Fotos 8.2 y 8.3).



Fotos 8.2 y 8.3. Efecto de Tin sobre cultivo de remolacha año 1998 y año 2004, respectivamente.

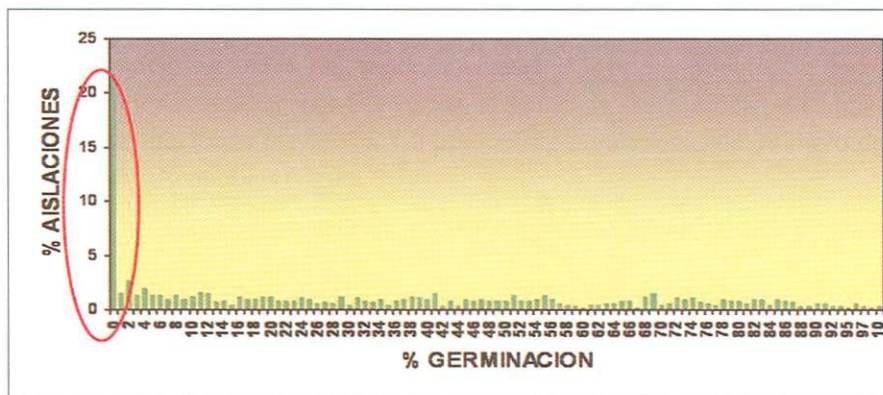


Figura 8.9. Susceptibilidad de aislamientos de *Cercospora beticola* a Thiophanato methyl (Topsin), 5 ppm, colectadas en North Dakota y Minnesota en el año 2004.



En la Figura 8.9 se observa que sólo un poco más del 20% de los aislamientos poseen susceptibilidad al fungicida y todo el resto tiene algún grado de resistencia a éste.

En la totalidad de los distritos en que se trabajó, se observó un alto grado de resistencia al producto, superiores al 60.9% (Figura 8.10).

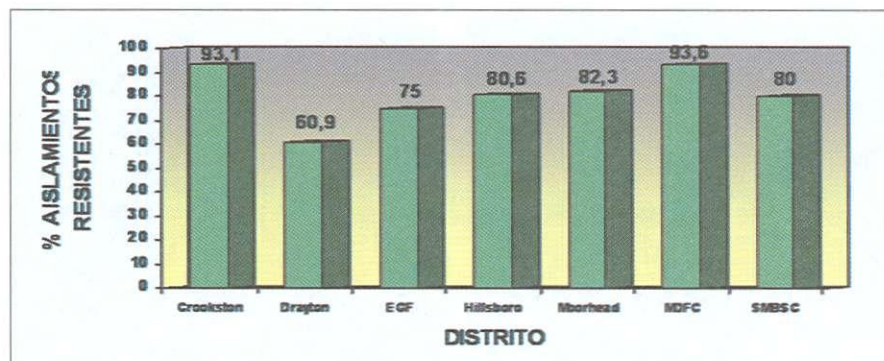


Figura 8.10. Resistencia de *C. beticola* a Thiophanato methyl (Topsin) 5 ppm, en diferentes distritos.

Al igual que en el mapa de tolerancia a Tin, en la Figura 8.11 se observan claramente los diferentes niveles de resistencia a Topsin, donde el color verde indica nula resistencia, el amarillo baja, el naranja moderada, el rosado alta media y el rojo alta resistencia.



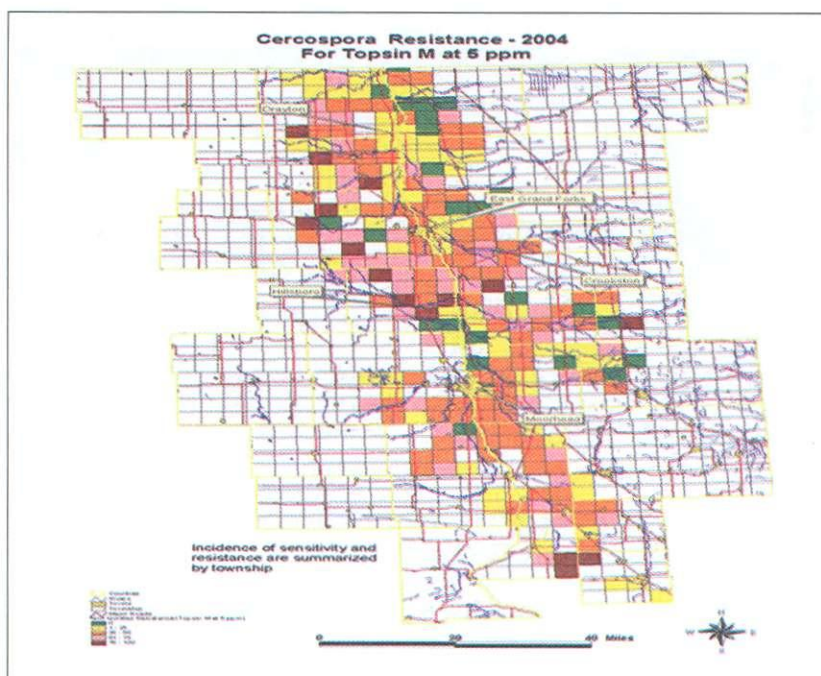


Figura 8.11. Mapa de resistencia sectorizada a Thiophanato methyl (Topsin) 5 ppm en el año 2004.

Se observa que más del 60% de 930 aislamientos presentan susceptibilidad a concentraciones bajas del producto (hasta 0,1 ppm), mientras que en concentraciones medias (0,1-0,98 ppm) el grado de susceptibilidad es bajo y en concentraciones mayores a 1,0 ppm existe un aumento del número de aislaciones susceptibles (Figura 8.12).

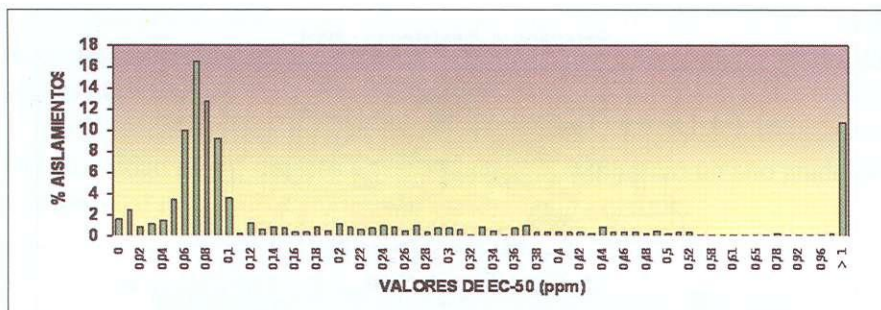


Figura 8.12. Susceptibilidad de aislamientos de *C. beticola*, colectadas en North Dakota y Minnesota en el año 2004, a Tetraconazole (Eminent), con mediciones de crecimiento radial (EC-50).

A continuación se presentan dos mapas de susceptibilidad/resistencia sectorizado, de dos años, el 2003 y 2004 (Figura 8.13), donde se aprecia un aumento de los sectores que desarrollaron algún grado de resistencia con respecto al anterior. Cabe señalar que el producto Eminent se comenzó a utilizar el año 1999 y ya el 2003 había alcanzado una resistencia que aumentó para el siguiente año.

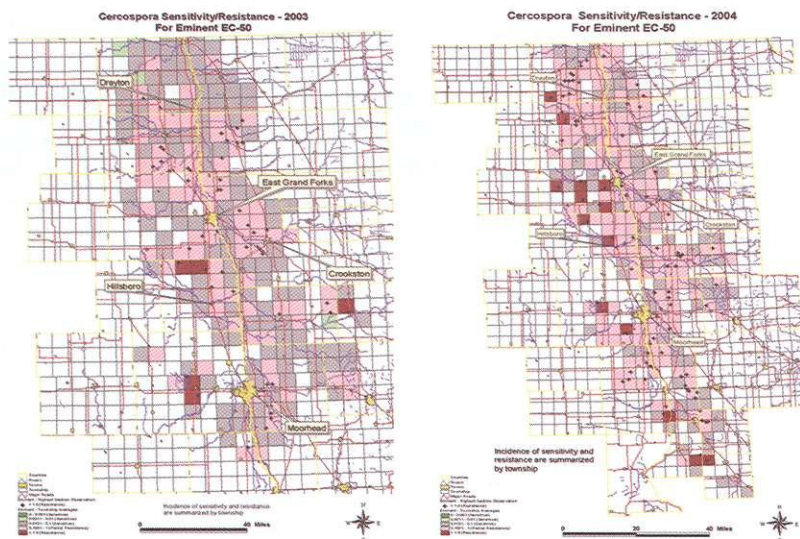


Figura 8.13. Mapas de susceptibilidad sectorizado para Tetraconazole (Eminent) en los años 2003 y 2004, respectivamente.

En la siguiente Figura 8.14 se muestra la cantidad de aislamientos que alcanzan la EC-50 a diferentes concentraciones. Así, se observa que el hongo adquiere cierto grado de resistencia cada año, incluso en concentraciones mayores a 1,0 ppm.

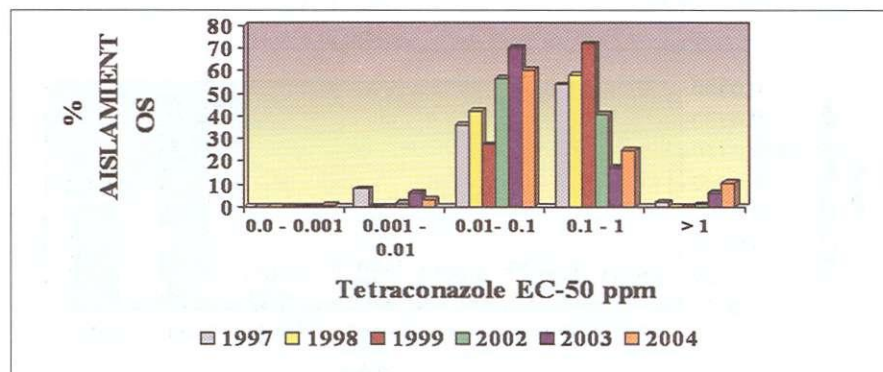


Figura 8.14. Rango de susceptibilidad de aislamientos de *C. beticola*, colectadas desde North Dakota y Minnesota, al Tetraconazole (Eminent), entre los años 1997 y 2004.

Así, más del 70% de los aislamientos son sensibles al producto y el resto ya muestra algún grado de resistencia, lo cual es preocupante por el corto tiempo de utilización del producto (Figura 8.15).

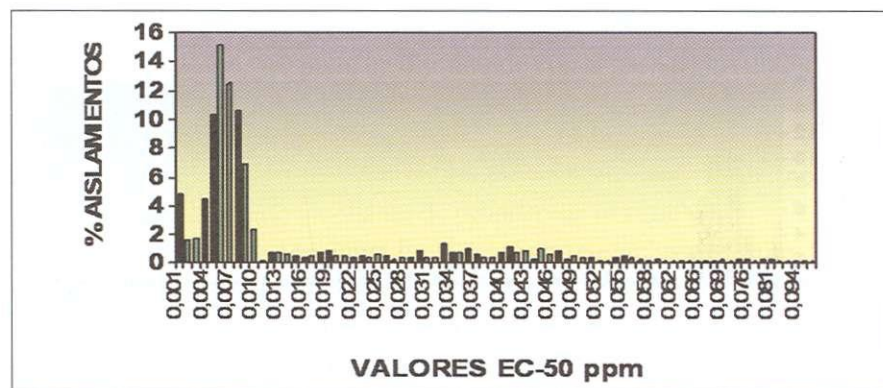


Figura 8.15. Susceptibilidad (EC-50) de aislaciones de *C. beticola*, colectadas en North Dakota y Minnesota en el año 2004, a Pyraclostrobin (Headline).



Así, se tenían aislamientos del hongo de los años 1997 al 2002, a los cuales se les aplicó Headline, obteniendo concentraciones efectivas muy bajas. Y no fue hasta el año 2003, primera aplicación de éste, donde se produce un fuerte aumento de EC-50 y, por ende, un aumento de la resistencia a dicho producto (Figura 8.16).

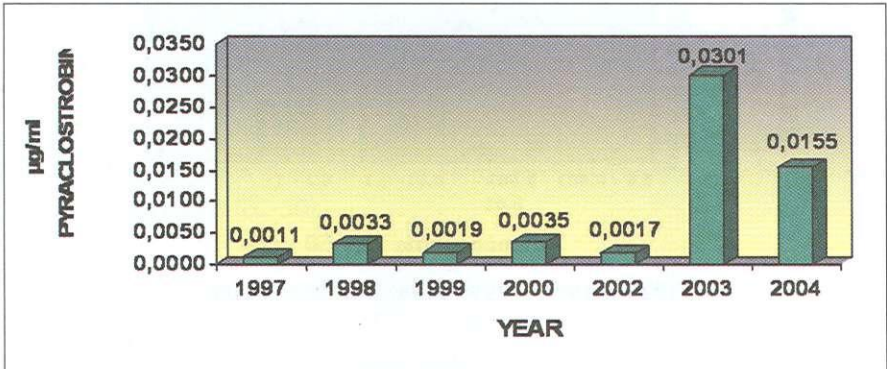


Figura 8.16. Susceptibilidad de aislaciones de *C. beticola* a Pyraclostrobin (Headline) desde los años 1997 al 2002 y comparados con lo obtenido los años 2003 y 2004.

También se presentaron cerca de un 65% de las aislaciones susceptibles al producto, en concentraciones bajas (hasta 0,001 ppm). El resto muestra algún grado de resistencia (Figura 8.17).

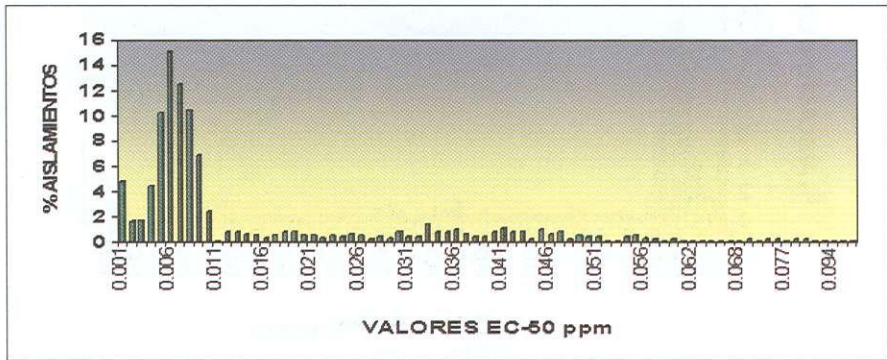


Figura 8.17. Susceptibilidad, EC-50, de aislaciones de *C. beticola*, colectadas en North Dakota y Minnesota, a Trifloxystrobin (Gem), en el año 2004.

Igual que en el caso anterior, en la Figura 8.18 se presentan las diferentes susceptibilidades del hongo hacia el producto, en aislamientos guardados desde el año 1997 al 2000, comparados con lo obtenido el 2004. Se observa que en los primeros años la susceptibilidad era mucho mayor, respecto a lo observado el año 2004, mostrando que el patógeno adquiere cierta resistencia.

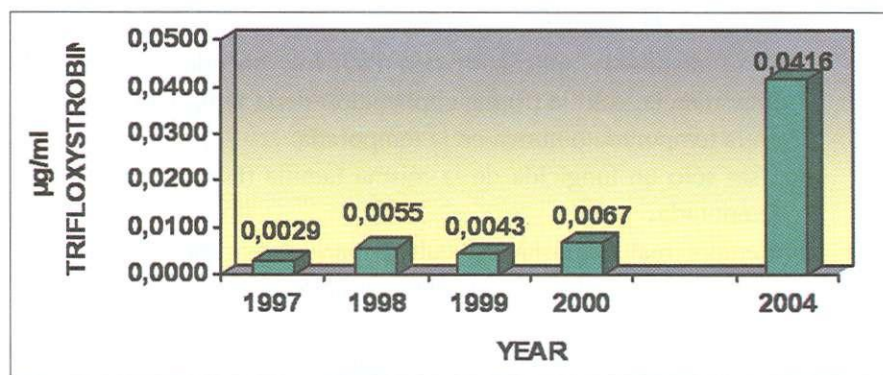


Figura 8.18. Susceptibilidad de aislaciones de *C. beticola* a Trifloxystrobin (Gem) desde los años 1997 al 2000, comparado con lo obtenido el año 2004.

## 8.4. CONCLUSIONES

- La tolerancia Tin, 1,0 ppm, ha disminuido con el paso de los últimos años, debido, probablemente, al uso alternado con otros fungicidas, reduciendo con esto el número de aplicaciones.
- La resistencia a Topsin, 5,0 ppm, ha ido en aumento y, por el contrario, Tin se ha masificado en el área de producción del cultivo.
- La susceptibilidad a Eminent ha sido relativamente estable en el tiempo, pero ha aumentado lentamente el número de aislamientos resistentes EC-50 > 1,0 ppm, lo cual indica que se ha reducido la sensibilidad hacia el producto.
- Los tres nuevos productos pertenecen a la misma familia, las Estrobilurinas, por lo que se hace necesario continuar los estudios en este ámbito, con el fin de evitar el desarrollo de resistencia hacia éstos.

- La idea es tratar de desarrollar un nuevo estudio en el cual se determine, a nivel genético, el motivo de la reducción de la susceptibilidad de *C. beticola*.
- Los pronosticadores no sólo sirven en el manejo de enfermedades, sino también en el manejo de resistencia de determinados productos.
- En el control de enfermedades la recomendación integral, incluye:
  - Rotación de productos químicos.
  - Si se decide la aplicación con Eminent, hacerlo en orden de importancia, solo la primera aplicación de la temporada, una vez en la temporada o nunca en la temporada.
  - Usar sólo un fungicida de la misma familia (Estrobilurinas) en la temporada.
  - Siempre realizar visitas al cultivo para determinar el momento preciso en el cual se produce la aparición de la enfermedad.
  - Finalmente, para realizar una elección correcta de productos, siempre utilizar los DIV's del sistema NDAWN y los mapas de resistencia sectorizados.

## CAPÍTULO 9

### **SISTEMA DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO USANDO ESTACIONES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS**

*Autores*

**Samuel Ortega-Farias.**

Ing. Agrónomo, M.S., Ph.D.

Director Centro de Investigación  
y Transferencia en Riego y  
Agroclimatología – CITRA,  
Universidad de Talca.  
sortega@utalca.cl

**Marcos Carrasco B.**

Ing. Agrónomo,  
Centro de Investigación y  
Transferencia en Riego y  
Agroclimatología– CITRA,  
Universidad de Talca.  
mcarrasco@utalca.cl

La programación del riego es una metodología que permite determinar el nivel óptimo de agua a aplicar en cada período fenológico de la vid o frutal, de acuerdo a las interacciones específicas de suelo, planta, clima, las cuales son integradas a través de modelos bio-matemáticos. Esta técnica consiste en establecer la frecuencia (¿Cuándo regar?) y tiempo de riego (¿Cuánto regar?) de acuerdo a sectores homogéneos de suelo y vigor del huerto o viñedo. Para programar el riego es esencial estimar tanto la evapotranspiración real y la cantidad de agua que puede almacenar el suelo en la zona de raíces. La programación del riego es entonces un procedimiento que permite establecer el momento oportuno del riego y la cantidad exacta de agua a aplicar en cada período fenológico. Sin embargo, esta técnica requiere de la calibración local de algunos parámetros incorporados en su algoritmo tales como coeficiente de cultivo y criterio de riego (Ortega-Farias *et al.*, 2003) (Figura 9.1).

En los países desarrollados, la programación del riego ha estado asociada al uso de sistemas informáticos y a redes de estaciones meteorológicas automáticas que permiten entregar en tiempo real la información necesaria para aplicar el agua de riego en forma oportuna. De este modo, en varios países del mundo se observa una fuerte tendencia a usar estaciones meteorológicas automáticas para programar el riego y así optimizar el uso del agua en la producción de frutales, viñas, hortalizas y cultivos. Así por ejemplo, en Australia, Chile, España, México y Estados Unidos entre otros, se han establecido redes de estaciones meteorológicas automáticas interconectadas vía telefonía celular, radio e Internet, con el objeto de ofrecer diferentes servicios entre los cuales destaca la “programación del riego” (Carlson *et al.*, 1998; Craddock, 1990; López y López, 1992; Snyder y Pruitt, 1985; Snyder *et al.*, 1984; Sickler, 1998). Esta tecnología iniciada en los años ochenta ha tenido un gran impacto económico en el sector agrícola, pues ha permitido mejorar significativamente la eficiencia del uso del agua y ha contribuido a incrementar la calidad y rendimiento de los productos agrícolas de exportación (FAO, 1990).

Como ejemplo se puede mencionar el caso de México, donde se ha implementado un “Sistema de Pronóstico del Riego en Tiempo Real” que posee redes de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) en los distritos del valle de Carrizo, Sinaloa y Río Fuerte. La implementación de este sistema ha



permitido reducir los volúmenes de agua para el riego en un 20% y aumentar los rendimientos de los cultivos en un 26 % (Ojeda *et al.*, 1998; Ojeda y Sifuentes, 1998). Además, el sistema ha reducido la erosión del suelo debido a un mejor control del caudal de agua aplicado en los sistemas de riego por surco y tendido. Todo lo anterior, según Ojeda *et al.*, (1998), ha contribuido a mejorar la calidad de vida del sector rural y aumentar las fuentes de trabajo debido a una actividad agrícola más estable en el tiempo.

Similares resultados han sido obtenidos por el “California Irrigation Management Information System” (CIMIS), el cual ofrece un servicio de programación del riego en tiempo real a agricultores ubicados en diferentes condados del Estado de California, lo cual ha contribuido a optimizar la frecuencia de riego y reducir la cantidad de agua aplicada en los frutales y viñas. Para esto en el año 1984 se estableció una red de 40 EMAs distribuidas en diferentes distritos agroclimáticos del Estado de California para entregar a los agricultores vía internet, fax o teléfono información climática y recomendaciones de riego para frutales y viñas regados por surcos y goteo (Craddock, 1990; Snyder *et al.*, 1984).

En Chile, el Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA) de la Universidad de Talca implementó, en 1996, una red de estaciones meteorológicas con el objeto de asesorar a los agricultores de la VII Región en el control fitosanitario y programación del riego. Con este sistema, los productores obtienen la información climática procesada, en forma rápida y expedita, durante las 24 horas vía teléfono/módem. Gracias a este sistema, en tomates regados por goteo y cultivados bajo invernadero se logró reducir la aplicación de agua en un 150% y un importante incremento de la calidad (Márquez, 1998). En maíz semillero se logró aumentar la producción entre un 14% y un 31% con sólo ajustar las frecuencias de riego a las características de suelo y clima. En viñas regadas por goteo se observó una disminución en los tiempos de riego en alrededor del 50%, lo que significó un ahorro de agua entre un 30% y un 60% con aumentos de la calidad del vino de hasta un 30%.



Figura 9.1. Etapas para una adecuada programación del riego.

## 9.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA METEOROLÓGICO

El sistema meteorológico está formado por un módulo central y una red de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) (Foto 9.1). El módulo central está encargado de recibir, procesar y almacenar la información de suelo (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, profundidad de raíces efectivas), de clima (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitaciones) y cultivar (coeficiente de riego, vigor y objetivos de producción). Las EMAs están encargadas de medir, en diferentes localidades, variables climáticas en intervalos de 15 minutos, las cuales son transmitidas vía telemetría a la base central que está ubicada en el laboratorio del CITRA. De este modo, el sistema determina la evapotranspiración real del viñedo, capacidad de estanque del suelo, frecuencia y tiempo de riego para cada sector homogéneo en cuanto a condiciones de suelo, clima y vigor (Ortega-Farías *et al.*, 2003).



Foto 9.1. Estación meteorológica automática (EMA) puesta en terreno.

### 9.1.1. Requerimientos de Información

Para realizar una correcta programación del riego es esencial determinar el consumo de agua de la planta (evapotranspiración), la cantidad de agua almacenada en el suelo explorada por las raíces, y el comportamiento fenológico de la planta. Además, es necesario incorporar información adicional tal como manejo agronómico, sistema de riego, potencial productivo, etc., que de alguna forma condicionan la demanda de agua de los cultivos.

**a) Determinación del consumo de agua.** La medición del clima es fundamental para estimar el consumo de agua o evapotranspiración real ( $ET_{real}$ ) del cultivo. Esta variable de entrada en el modelo de programación del riego se cuantifica utilizando la evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ), la cual es corregida por un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) (ecuación 1). La  $ET_{real}$  representa la suma del agua necesaria para cubrir la transpiración que realizan las plantas desde sus partes verdes (sobre todo desde las hojas), y la evaporación que se produce desde la superficie del suelo. La cantidad de agua que suponen ambos procesos, transpiración y evaporación, suele considerarse de forma conjunta

simplemente por que es muy difícil calcularla por separado. En la práctica del riego, el estudio de la ET<sub>real</sub> sirve para determinar las necesidades de riego de los cultivos, programar los riegos para alcanzar una eficiencia óptima, diseñar sistemas de riego y dimensionar embalses. La ET<sub>real</sub> se cuantifica como:

$$ET_{real} = ETr * Kc \quad (1)$$

Donde ET<sub>real</sub> = evapotranspiración real del cultivo (mm d<sup>-1</sup>); ETr = evapotranspiración de referencia (mm d<sup>-1</sup>) y Kc = coeficiente de cultivo (adimensional).

• **Evapotranspiración de referencia (ETr).** La ETr corresponde a la cantidad de agua transpirada por unidad de área y por unidad de tiempo de una cubierta vegetal de pasto (alfalfa o festuca), entre 8 a 15 cm que cubre completamente el suelo y que presenta un óptimo manejo agronómico (buenas condiciones de humedad del suelo, estado sanitario y fertilidad). En otras palabras, el cultivo se encuentra en óptimas condiciones de crecimiento y la ETr va a depender solamente de las condiciones atmosféricas predominantes (Figura 9.2). La mayoría de los modelos de evapotranspiración utilizados en agricultura han sido desarrollados en condiciones de referencia. En relación a esto, la FAO 56 recomienda utilizar el modelo Penman-Monteith, como base para determinar las necesidades de agua de los cultivos del siguiente modo (Allen *et al*, 1998):

$$ET_r = \frac{0,408 * \Delta(Rn - G) + \gamma * \frac{900}{(T + 273)} U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * U_2)} \quad (2)$$

Donde ETr = evapotranspiración de referencia (mm d<sup>-1</sup>);

Rn = radiación neta (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>); G = calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>);

$T$  = temperatura del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta$  = pendiente de la curva de presión de vapor en saturación ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$U_2$  = velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $e_s$  = presión de vapor a saturación ( $\text{kPa}$ );

$e_a$  = presión de vapor actual ( $\text{kPa}$ );  $\gamma$  = constante sicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Por lo tanto, el uso de una EMA permite llevar un registro detallado y continuo de información climática (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar) en intervalos cortos de tiempo y durante las 24 horas del día. Esto nos permite, mediante programas computacionales o planillas electrónicas, calcular la  $\text{ET}_r$  en tiempo real.



Figura 9.2. Evapotranspiración de referencia ( $\text{ET}_r$ ) (FAO, 2006).

- **Coefficiente de cultivo.** Para calcular las necesidades de agua de las plantas, además de conocer las características físicas del suelo y las condiciones climáticas de la zona, se hace imprescindible conocer, además, las características del cultivo. La influencia del cultivo y su estado fenológico es importante ya que las necesidades hídricas dependerán del tipo de planta y de su estado de desarrollo. Las características propias de las plantas dicen relación con la resistencia al flujo de agua que presentan a nivel del sistema radical, la resistencia a la pérdida de agua a través de los estomas de las hojas, la arquitectura de la planta (altura, rugosidad) y el grado de cubrimiento del suelo, que es variable a lo largo de la estación de crecimiento.

Estos diferentes factores se engloban en el coeficiente de cultivo  $K_c$ , que es propio de cada especie y variable a lo largo del ciclo de vida del mismo (Sellés y Ferreyra, 1999). El coeficiente de cultivo describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la cosecha. En relación a esto, en los cultivos anuales normalmente se diferencian 4 etapas o fases de cultivo (Figura 9.3):

- **Inicial:** Desde la siembra o brotación hasta un 10% de la cobertura del suelo.
- **Desarrollo:** Desde el 10% de cobertura y durante el crecimiento activo de la planta.
- **Media:** Entre floración y fructificación, correspondiente en la mayoría de los casos al 70-80% de cobertura máxima de cada cultivo.
- **Maduración:** Desde madurez hasta cosecha.

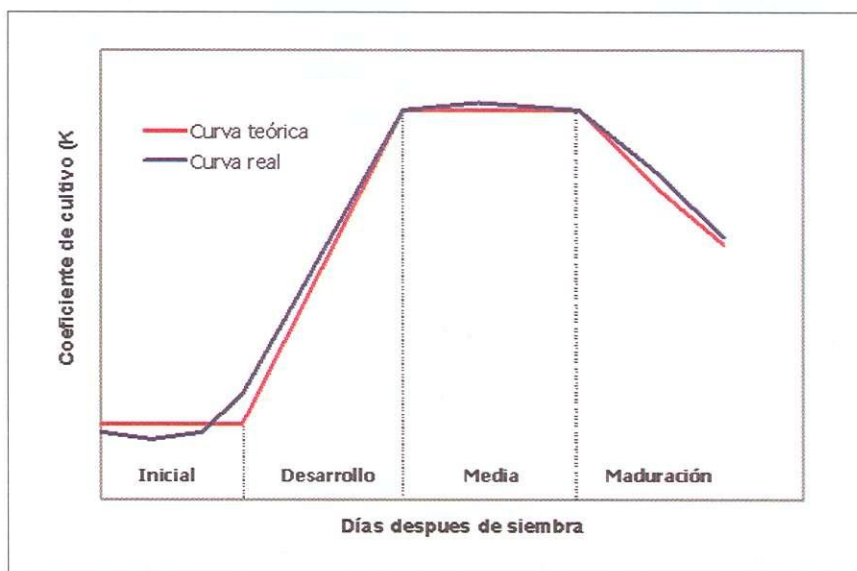


Figura 9.3. Evolución del Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) en el tiempo.

Como se observa en la Figura 9.3, el  $K_c$  comienza siendo pequeño y aumenta a medida que la planta cubre más el suelo. Los valores máximos de  $K_c$  se alcanzan en la floración, se mantienen durante la fase media y finalmente decrecen durante la fase de maduración. Al respecto, lo mejor es disponer de valores de  $K_c$  para cada cultivo obtenidos localmente y para distintas fechas de siembra, pero en ausencia de esta información se pueden usar valores referenciales de  $K_c$  para varios cultivos (Cuadro 9.1).

Para árboles frutales, comúnmente los coeficientes de cultivo suelen ser expresados por meses (Cuadro 9.2) y usualmente en función del grado de cobertura del suelo, el cual indica el porcentaje de superficie de suelo que ocupa la masa arbórea. En caso de que exista algún cultivo puesto en la entrehilera, los  $K_c$  aumentarían debido al consumo de este cultivo. Lo mismo ocurriría si existieran malezas.

Existe una variante del concepto de  $K_c$ , que permite el cálculo de la  $ET_{real}$  bajo condiciones estándar donde no existen limitaciones de crecimiento de cultivo o de evaporación. El procedimiento para predecir los efectos específicos de la humedad en los valores del  $K_c$ , consiste en dividir el  $K_c$  en dos coeficientes distintos: uno correspondiente a la transpiración de la planta, conocido como el coeficiente basal ( $K_{cb}$ ) que se define como la tasa de evapotranspiración del cultivo en relación a la  $ET_r$ , y otro relacionado con la evaporación del suelo ( $K_e$ ). De este modo, la  $ET_{real}$  se calcula como:

$$ET_{real} = (K_{cb} + K_e) * ET_r \quad (3)$$

Donde  $ET_{real}$  = Evapotranspiración real del cultivo;  $K_{cb}$  = coeficiente basal (adimensional);  $K_e$  = coeficiente de evaporación del suelo (adimensional) y  $ET_r$  = evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

El procedimiento para calcular el coeficiente de cultivo dual puede ser encontrado en el manual de la FAO N°56 (Allen *et al.*, 1998).



Cuadro 9.1. Valores de coeficientes de cultivo (Kc) para distintos cultivos herbáceos, hortícolas y frutales.

| Cultivo          | Fase del cultivo |            |       |            |
|------------------|------------------|------------|-------|------------|
|                  | Inicial          | Desarrollo | Media | Maduración |
| Arveja           | 0,45             | 0,75       | 1,15  | 1,00       |
| Berenjena        | 0,45             | 0,75       | 1,15  | 0,80       |
| Cebolla (guarda) | 0,45             | 0,70       | 1,05  | 0,75       |
| Lechuga          | 0,45             | 0,60       | 1,00  | 0,90       |
| Maíz             | 0,40             | 0,80       | 1,15  | 0,70       |
| Melón            | 0,45             | 0,75       | 1,00  | 0,75       |
| Papa             | 0,45             | 0,75       | 1,15  | 0,85       |
| Pimentón         | 0,35             | 0,70       | 1,05  | 0,90       |
| Poroto verde     | 0,35             | 0,70       | 1,10  | 0,90       |
| Sandía           | 0,45             | 0,75       | 1,00  | 0,70       |
| Tomate           | 0,45             | 0,75       | 1,15  | 0,80       |
| Zanahoria        | 0,45             | 0,75       | 1,05  | 0,90       |
| Zapallo          | 0,45             | 0,70       | 1,00  | 0,70       |
| Maravilla        | 0,35             | 0,75       | 1,15  | 0,55       |
| Remolacha        | 0,40             | 0,80       | 1,15  | 0,80       |
| Soja             | 0,35             | 0,75       | 1,10  | 0,60       |
| Tabaco           | 0,35             | 0,75       | 1,10  | 0,90       |
| Avena            | 0,35             | 0,75       | 1,10  | 0,40       |
| Cebada           | 0,35             | 0,75       | 1,15  | 0,45       |
| Sorgo            | 0,35             | 0,75       | 1,10  | 0,65       |
| Trigo            | 0,35             | 0,75       | 1,15  | 0,45       |
| Nogal            | 0,5              | 1,15       | 0,85  | 3,0        |
| Berries          | 0,3              | 1,05       | 0,5   | 1,5        |

[Fuente: Jara y Valenzuela, 1998].

Cuadro 9.2. Valores de Coeficiente de cultivo (Kc) en frutales.

| Cultivo      | Valores de Kc mensuales |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | Jul                     | Ago  | Sep  | Oct  | Nov  | Dic  | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  |
| Cítricos     | 0,85                    | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,80 | 0,80 | 0,75 | 0,75 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,85 |
| Palto        | 0,85                    | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,80 | 0,80 | 0,75 | 0,75 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,85 |
| Olivo        | 0,50                    | 0,50 | 0,65 | 0,60 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,50 |
| Manzano      | ---                     | ---  | ---  | 0,40 | 0,60 | 0,85 | 1,00 | 1,00 | 0,95 | 0,70 | ---  | ---  |
| Peral        | ---                     | ---  | ---  | 0,40 | 0,55 | 0,75 | 0,90 | 0,90 | 0,70 | 0,65 | ---  | ---  |
| Durazno      | ---                     | ---  | ---  | 0,40 | 0,55 | 0,75 | 0,90 | 0,90 | 0,70 | 0,65 | ---  | ---  |
| Damasco      | ---                     | ---  | ---  | 0,40 | 0,55 | 0,75 | 0,90 | 0,90 | 0,70 | 0,65 | ---  | ---  |
| Cerezo       | ---                     | ---  | ---  | 0,40 | 0,60 | 0,85 | 1,00 | 1,00 | 0,95 | 0,70 | ---  | ---  |
| Círuelo      | ---                     | ---  | ---  | 0,40 | 0,55 | 0,75 | 0,90 | 0,90 | 0,70 | 0,65 | ---  | ---  |
| Uva de mesa  | ---                     | ---  | ---  | 0,45 | 0,60 | 0,70 | 0,85 | 0,85 | 0,70 | 0,60 | 0,50 | ---  |
| Vid vinífera | ---                     | ---  | ---  | ---  | 0,15 | 0,35 | 0,50 | 0,30 | 0,20 | ---  | ---  | ---  |

[Fuente: Jara y Valenzuela, 1998].



### ■ Información de suelo y su importancia en la programación del riego.

Cuando se riega no debe utilizarse el concepto erróneo de que se está dando agua a las plantas en forma directa, sino que realmente se está reponiendo el agua en el suelo, para que las plantas posteriormente la aprovechen a lo largo del período comprendido entre dos riegos consecutivos. Por lo tanto, el suelo actúa como un depósito o estanque donde se almacena el agua de riego, para luego ser usada por las plantas. El agua almacenada en el suelo y que puede ser utilizada por el cultivo, es la diferencia entre la cantidad de agua almacenada a capacidad de campo (límite superior) y punto de marchitez permanente (límite inferior). Lo anterior se denomina humedad aprovechable (Figura 9.4) y se define como:

$$HA = (CC - PMP) \quad (4)$$

Donde HA= humedad aprovechable (%), CC= capacidad de campo (%), PMP = punto de marchitez permanente (%). Por otro lado, el agua realmente disponible en el suelo o lámina neta se puede calcular como:

$$Ln = \left( \frac{CC - PMP}{100} \right) \times Pr \times Cr \quad (5)$$

Donde: Ln = lámina neta (mm); CC = capacidad de campo (%); PMP = punto de marchitez permanente (%); Pr = profundidad de raíces (mm) y Cr = criterio de riego (fracción).

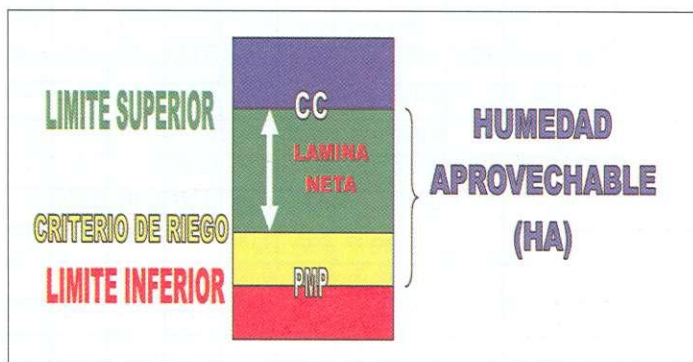


Figura 9.4. Representación del agua disponible en el suelo.

La profundidad de raíces determina la cantidad de agua que puede extraer una planta desde el perfil de suelo que ocupan sus raíces. Como regla general, se acostumbra asumir que los cultivos extraen el 40% del agua consumida desde el primer cuarto de raíces, el 30% del segundo cuarto, el 20% del tercer cuarto y el 10% del último cuarto. Cuando el suelo es poco profundo, disminuye el volumen de suelo que puede ser explorado por las raíces y en consecuencia también disminuye este patrón de extracción de agua (Figura 9.5).

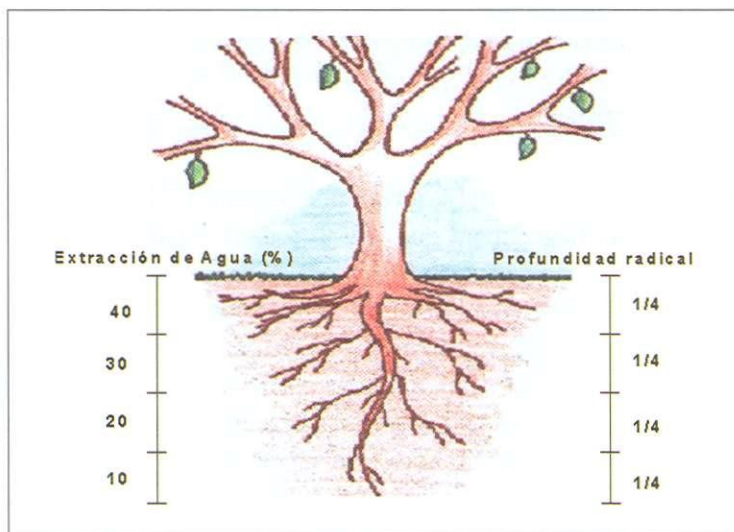


Figura 9.5. Porcentaje de extracción de agua a través de las raíces.

Por lo tanto, el número de días entre dos riegos consecutivos se estima como:

$$Fr = \left( \frac{Ln}{ET_{real}} \right) \quad (6)$$

Donde  $Fr$  = frecuencia de riego (d);  $Ln$  = lámina neta (mm) y  $ET_{real}$  = evapotranspiración real del cultivo ( $\text{mm d}^{-1}$ ). Por otro lado, el tiempo de riego para frutales y viñas se puede calcular de la siguiente manera:

$$TR = \frac{ET_{real} \times AU}{Ne \times Ea \times q} \quad (7)$$

Donde TR = tiempo de riego (h);  $ET_{real}$  = evapotranspiración real del cultivo ( $\text{mm d}^{-1}$ ); AU = área unitaria asignada al cultivo o marco de plantación ( $\text{m}^2$ ); Ne = número de emisores por planta (n); Ea = eficiencia de aplicación (tanto por uno) y q = caudal del emisor ( $\text{l h}^{-1}$ ).

## 9.2. CONCLUSIONES

La adecuada programación del riego permite responder a las cuatro preguntas fundamentales del riego: ¿para qué regar?, ¿cómo regar?, ¿cuándo regar? y ¿cuánto regar?. Esta técnica se está haciendo cada vez más relevante dentro de los costos de producción de los agricultores, quienes deben maximizar los rendimientos y calidad de sus productos. Por ende, la programación de riego basada en el uso de estaciones meteorológicas automática resulta en una alternativa viable y que puede ser adoptada fácilmente por los agricultores. Sin embargo, se hace imprescindible la validación y calibración local de los modelos, por lo que sólo de esta forma se asegurará obtener el máximo provecho a la inversión y se obtendrá el éxito en el objetivo productivo deseado.

## 9.3. LITERATURA CITADA

Allen R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56.

Carlson, J. D., Derek, S., Greenfield, J., Usman, A. 1998. Development of Near-Real-Time, Web-Based Management Tools for Agriculture Resources Using the Oklahoma Mesonet. 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology, edited by Strand, J. F. and Goens, D. American Meteorological Society. Vol. 1: 254-261.

Craddock, E. 1990. "The California Irrigation management Information System (CIMIS). Management of farm Irrigation System, edited by Hoffman, G. J. Howell, T. A., and Solomon, K. H. American Society of Agricultural Engineers. 1040 pp.

Doorembos, J. y Pruitt, W. O. 1976. "Las necesidades de agua de los Cultivos". Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Colección de Riego y Drenaje. Paper 24, FAO. Roma. 190 pp.

FAO. 1990. Aspectos agrometeorológicos de la protección operativa de los cultivos. Nota Técnica N°192.

FAO. 2006. Sitio web: [www.fao.org](http://www.fao.org). [visitado en Mayo 2006].

Jara, D. y Valenzuela, A. 1998. Necesidades de Agua de los Cultivos. CNR-U. de Concepción. Chillán, Chile. 24 p.

López, P. F. y López, H. C. 1992. "Servicio de Asesoramiento de Riego". Agronomía del Riego editado por Martín de Santa Olalla, F. y De Juan Valero, J. A. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología. Universidad de Castilla – La Mancha. Ediciones Mundiprensa, Madrid. 732 pp.

Márquez, J. 1998. Determinación de las necesidades de agua tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. FA-144) de otoño bajo invernadero en la zona de Talca. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias. Tesis Ing. Agrónomo.

Ojeda, B. W. y Sifuentes, I. E. 1998. Uso de Parcelas de Validación como Herramienta de Apoyo en la Transferencia del Sistema de Calendarización del Riego en tiempo Real (SPRITER). En el D.D.R. 075. Especialistas en Riego y drenaje, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Ojeda, B. W., Rebolledo M. N.; González V. M.; Sifuentes I. E.; González C. J.; Espinoza G. T. 1998. Pronóstico del Riego en Zonas de Riego Asistido por Computadora. Especialistas en Riego y Drenaje, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Ortega-Farias, S., Rigetti, T., Sasso, F., Acevedo, C., Matus, F. and Moreno, Y. 2003. Site-specific management of irrigation water in grapevines. IX Latin American Congress on Viticulture and Enology; Symposium on Precision Viticulture, 55-71. Pontificia Universidad de Católica de Chile, Santiago.

Pizzarro, F. 1996. Riegos Localizados de Alta Frecuencia. Mundi-Prensa, España. 513 p.

Sellés, G.; Ferreyra, R.; Maldonado, P. 2002. Cámara de presión: Instrumento para Controlar el Riego a través de Mediciones del Estado Hídrico de las Plantas. Revista Aconex. N° 76: 18-22.

Sickler G. and Dogget, A. 1998. The Texas Mesonet-Concept to Reality. 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology, edited by Strand, J.F. and Goens, D. American Meteorological Society. Vol. 1: 243-246.

Snyder R. and Pruitt, W.O. 1985. "Estimating Reference Evapotranspiration with hourly data". VII – 1 –VII – 3. In Snyder, R, Henderson, D. W., Pruitt, W. O., and Dong, A. (Eds). Calif. Irrig. Mngmt. Info. System Final rep., Univ. Calif., Davis.

Snyder R., Pruitt, W. O. and Dong, A. 1984. "An Automatic Weather Station Network for Estimation of Evapotranspiration". International Comission of Irrigation and drainage. Paris.

## CAPÍTULO 10

### **PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN REMOLACHA (*Beta vulgaris* L.) UTILIZANDO EL MODELO DE PENMAN-MONTEITH Y EL EVAPORÍMETRO DE BANDEJA**

*Autores*

**René Aravena S.**

Lic. Agr., Universidad de  
Concepción, Facultad de  
Agronomía, Campus Chillán.  
Casilla 537.  
aravenarene@yahoo.es

**Isaac Maldonado I.**

Ing. Agr. M.Sc., Instituto de  
Investigaciones Agropecuarias,  
INIA Quilamapu, Chillán.  
Casilla 426.  
imaldona@inia.cl

**Celerino Quezada L.**

Ing. Agr. M.Sc., Universidad  
de Concepción, Facultad de  
Agronomía, Campus Chillán.  
Casilla 537.  
cequezad@udec.cl

La remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) es un importante cultivo anual de primavera sembrado entre la VI y X regiones del país, con una superficie, en la temporada 2004–2005, de 31.410 ha -ubicándose en el quinto lugar, luego del trigo, maíz, avena y papa- y un rendimiento aproximado de 82,7 ton/ha (ODEPA, 2005). Además, es uno de los primeros en tecnificación durante todo su proceso productivo (Campos, 2003). La distribución de esta superficie sembrada se concentra mayoritariamente en la VIII Región del Bío Bío, alcanzando más del 50% de ésta, con 16.210 ha y un rendimiento de 84 ton/ha (ODEPA, 2005).

El agua es fundamental en la absorción de nutrientes del suelo para su transporte en la planta y por su intervención en procesos fisiológicos fundamentales como la transpiración y fotosíntesis. Por esto, se hace necesario determinar su consumo para que no sea un factor limitante en la producción (Morillo-Velare *et al.*, 2001). Las necesidades de agua del cultivo están determinadas, entre otros aspectos, por la biomasa que puede alcanzar. Ésta puede estar influenciada por diversos factores, entre los cuales destacan el manejo del cultivo y el clima (Ferreira *et al.*, 1990).

Las condiciones restrictivas de disponibilidad de agua en la zona radicular de absorción, durante etapas críticas en el proceso productivo, pueden afectar “seriamente” el rendimiento final (Holzapfel *et al.*, 1995). Estos períodos críticos se pueden dividir en dos etapas: la primera, donde se define el potencial de rendimiento, y la segunda donde se expresa dicho potencial. En el primer caso podemos resaltar la etapa de establecimiento, que comprende los primeros 20 días después de la siembra, es decir, hasta que la planta emite su primer par de hojas verdaderas, período en el cual los riegos suplen el déficit de humedad, si éste existiera, y ayudan a las semillas a conseguir la imbibición, germinación y emergencia uniforme de plántulas. Del mismo modo, activan los herbicidas de preemergencia, indispensables para el adecuado control de las malezas en esta delicada etapa del cultivo. En el segundo caso, y no por eso menos importante, está la etapa que va desde el cierre de hileras hasta el final del riego del cultivo, en la que se produce el mayor crecimiento radicular y la acumulación de sacarosa (Astete, 2003).



La demanda de agua se puede determinar mediante el proceso integrado denominado evapotranspiración del cultivo (Ferreyra *et al.*, 1990). Éste es un componente esencial del balance de agua del suelo. Su conocimiento es de gran importancia para diferentes fines. Entre ellos están la determinación de requerimientos hídricos de los cultivos; el diseño y manejo de sistemas de riego; proyección de rendimiento de los cultivos; y estudios hidrológicos (Della Maggiora, 1997).

El consumo de agua por los cultivos o evapotranspiración, es el agua que usa un cultivo en la formación de tejidos, transpiración a través de las hojas, evaporación directa desde la superficie del suelo, más aquella cantidad de agua que se reintegra a la atmósfera debido a la evaporación de agua que es interceptada por la superficie foliar (Gurovich, 2001). La evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) depende exclusivamente de las condiciones climáticas, correspondiente a un cultivo estándar (gramínea o alfalfa) de 12 centímetros de altura, una resistencia de la cubierta vegetal fija de  $70 \text{ s m}^{-1}$ , un albedo de 0.23, uniforme, crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y que no ha sido sometido a déficit hídrico (Allen *et al.*, 1998).

Para la medición directa de la evapotranspiración de un cultivo en desarrollo, una cubierta vegetal de referencia o simplemente un suelo desnudo, existen instrumentos llamados lisímetros. Éstos consisten, básicamente, en un gran recipiente donde se establece un cultivo. Consta de un dispositivo de pesaje que permite determinar la variación de peso de éste a lo largo de un período determinado. Además, entre los métodos de cálculo para la estimación de la  $ET_0$  destacan: evaporímetro de bandeja Clase A, micrometeorológico de Penman-Monteith, Hargreaves, Blaney-Criddle y método de radiación entre otros (Morillo-Velarde *et al.*, 2001).

La ecuación de Penman-Monteith puede ser utilizada para determinar los requerimientos hídricos de los cultivos, cuando se dispone de sistemas automatizados, tales como los que se usan en la actividad frutícola para el pronóstico de enfermedades y plagas (Ortega-Farías, 1996). El modelo de Penman-Monteith requiere de mediciones simultáneas de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Estas

variables climáticas pueden ser registradas a través del uso de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs), que son más económicas y fáciles de mantener en comparación con los métodos micrometeorológicos y de balance hídrico, además de ser fáciles de trasladar de un lugar a otro (Ortega-Farías *et al.*, 2000).

La programación de riego puede realizarse con fines puramente técnicos o también con fines económicos, pero lo más frecuente es combinar ambos. En el primer caso se puede determinar el volumen y el período de riego a lo largo del ciclo de un cultivo para lograr la máxima producción. Éste es el criterio técnico puro. También se puede buscar el máximo beneficio en la aplicación de agua, correspondiente al criterio económico. Por último, podemos combinar los anteriores, es decir, lograr la mayor producción por unidad de agua aplicada (Martín De Santa Olalla y De Juan Valero, 1993). Para poder programar el riego, además de conocer la demanda de agua del cultivo, es necesario conocer la cantidad de agua que el suelo puede retener en la zona explorada por las raíces y que puede ser aprovechada por la planta, sin disminuir los rendimientos (Ferreira, 1990).

Tradicionalmente los métodos de programación de riego se pueden ser divididos en tres grupos. El primero comprende los que se basan únicamente en el conocimiento del estado hídrico del suelo, es decir, en el manejo de la reserva útil del suelo y del nivel de agotamiento permisible. Tal es el caso de los métodos que utilizan los bloques de yeso, sondas o tensiómetros. El segundo grupo está basado en el conocimiento del estado hídrico de la planta, bien de forma directa, como en el caso de la cámara de presión, o bien a través de su temperatura como indicador. Por último, está el grupo basado en la valoración del balance hídrico del conjunto suelo-planta-atmósfera. Esta valoración puede hacerse en superficies muy reducidas, como el caso de los lisímetros, o en unidades mayores, parcelas o zonas de riego, con diferentes modelos de precisión (Martín De Santa Olalla y De Juan Valero, 1993).

## 10.1. OBJETIVOS

Evaluar el sistema de programación de riego en remolacha (*Beta vulgaris* L.), bajo cobertura total, mediante el modelo de Penman-Monteith, utilizando una estación meteorológica automática (EMA) para alimentar el modelo.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- a) Evaluar parámetros vegetativos y productivos durante toda la temporada de riego del cultivo.
- b) Correlacionar las evapotranspiraciones obtenidas mediante el método del evaporímetro de bandeja Clase A (Testigo) y el modelo de Penman-Monteith.
- c) Contrastar el estado hídrico de la planta respecto del balance calculado según Penman-Monteith y evaporímetro de bandeja.

## 10.2. HIPÓTESIS

Mediante el modelo de Penman-Monteith se consigue realizar una adecuada programación de riego en remolacha, obteniendo resultados iguales o mejores que con el evaporímetro de bandeja.

## 10.3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 10.3.1. Ubicación geográfica

El ensayo se realizó en una siembra comercial de remolacha, durante la temporada 2004-2005, en el fundo "San Fernando", ubicado aproximadamente a 34 km al sur de la ciudad de Chillán, en la Comuna de El Carmen (36°54'30" Lat. Sur, 72°04'30" Long. Oeste) (Figura 10.1), propiedad de don Paulo Basterrica, agricultor contratado por IANSAGRO para dicha temporada.

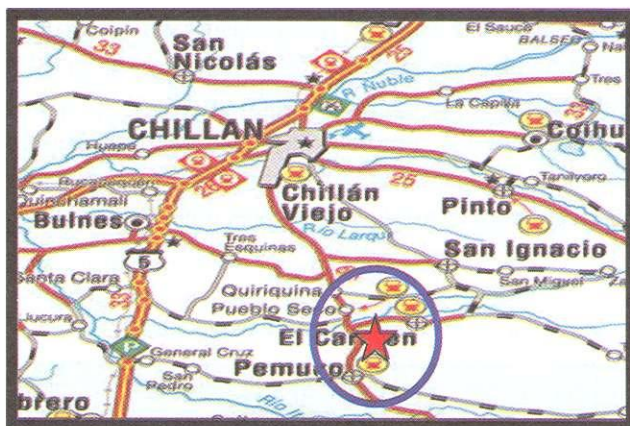


Figura 10.1. Mapa de ubicación geográfica del ensayo.

### 10.3.2. Clima

El ensayo fue ubicado en un área influenciada por el agroclima Santa Rosa, con precipitaciones anuales promedio entre los 1.000 y 1.200 mm, y una evapotranspiración entre 860 y 1.000 mm. La temperatura media anual es de 13,1 – 13,6°C, la temperatura mínima en el mes de julio oscila entre 3,0 y 3,9°C, y la máxima en enero lo hace entre 27,8 y 29,0°C. Existe un período libre de heladas con duración de 5 meses (Del Pozo y Del Canto, 1999). La distinta información meteorológica fue obtenida a través de una estación meteorológica automática ubicada en el predio. Los parámetros a evaluar por ésta fueron: humedad relativa del aire, velocidad del viento, temperatura del aire y radiación solar. Además, se ubicó una bandeja de evaporación Clase A, también dentro el predio.

En ambos casos las evapotranspiraciones diarias se calcularon de 10 de la mañana a 10 de la mañana siguiente.

### 10.3.3. Suelo

El ensayo fue ubicado en un suelo de textura franca arcillosa en superficie

y arcillosa en profundidad (Cuadro 10.1), clasificado dentro de la serie de suelos Mirador, miembro de la familia Mirador, fina, mixta, térmica Aquic Palexeralfs (CIREN, 1999). Se realizó también un muestreo de suelo, para su posterior caracterización físico-hídrica. Es decir, determinación de capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), densidad aparente (Da) y textura en el Laboratorio de Suelos INIA ubicado en INIA Quilamapu, Chillán.

Cuadro 10.1. Propiedades físico-hídricas del ensayo.

| Prof. (cm.) | Da <sup>a</sup> | CC <sup>b</sup> | PMP <sup>c</sup> | Ar <sup>d</sup> | Li <sup>e</sup> | Arc <sup>f</sup> | Textura <sup>g</sup> |
|-------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------|
| 0-30        | 1.28            | 31.81           | 19.8             | 29.4            | 44              | 26.6             | Franco Arcilloso     |
| 30-60       | 1.38            | 30.83           | 21.8             | 18.2            | 35              | 46.8             | Arcilloso            |
| más 60      | 1.34            | 28.08           | 18.8             | 33.2            | 34              | 32.8             | Franco Arcilloso     |

<sup>a</sup>Densidad aparente (g cc<sup>-1</sup>). <sup>b</sup>Capacidad de campo (%). Determinado a 1/3 atm. <sup>c</sup>Punto de marchitez permanente (%). Determinado a 15 atm. <sup>d</sup>% Arena. <sup>e</sup>% Limo. <sup>f</sup>% Arcilla. <sup>g</sup>Sistema Internacional. <sup>d, e y</sup>

<sup>f</sup> Determinado con el método Boyoucos.

#### 10.3.4. Manejo del cultivo

Las distintas labores culturales, como preparación de suelo, siembra, fertilización, manejo fitosanitario, etc., fueron realizadas según las recomendaciones de IANSAGRO para la zona.

#### 10.3.5. Tratamientos

**T<sub>0</sub> (Testigo):** realización de balances hídricos diarios. Para la determinación de la evapotranspiración de referencia del cultivo se usó el método utilizado por IANSAGRO, es decir, el evaporímetro de bandeja Clase A, ubicado en el predio. Para el cálculo corregido se usaron los coeficientes de cultivo precisados por IANSAGRO. Como criterio de riego se usó el volumen de agua equivalente al 50% de la humedad aprovechable a 30 cm de profundidad.

**T<sub>1</sub> (Tratamiento):** realización de balances hídricos diarios. Para la determinación de la evapotranspiración de referencia del cultivo se usó el modelo de Penman-Monteith, modelo alimentado con información obtenida de una estación meteorológica automática ubicada en el predio. El coeficiente de cultivo fue el mismo utilizado en el Testigo. Como criterio de riego se usó el volumen de agua equivalente al 50% de la humedad aprovechable, también a una profundidad de 30 cm. La evapotranspiración del cultivo, en ambos casos, se obtuvo mediante el siguiente modelo:

$$ET_c = ET_o * Kc$$

Donde:

- ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo (mm/día).
- ET<sub>o</sub>: Evapotranspiración de referencia, obtenida mediante el evaporímetro de bandeja clase A o a través del modelo de Penman-Monteith (mm/día).
- K<sub>c</sub>: Coeficiente de cultivo utilizado por IANSAGRO.

El balance hídrico se basó en el descrito por Morillo-Velarde et al (2001), como sigue a continuación:

$$\text{SALDO INICIAL} + \text{APORTES} - \text{CONSUMO} = \text{SALDO FINAL}$$

Donde:

- Saldo inicial: Reserva de agua en el suelo.
- Aportes: Lluvias o riegos.
- Consumo: Evapotranspiración del cultivo.
- Saldo final: Remanente de humedad en el suelo.

La recomendación de riego se obtuvo luego de finalizado el período correspondiente a la frecuencia de riego, mediante el siguiente modelo:

$$\text{RECOMENDACIÓN} = \text{HUMEDAD A CAPACIDAD DE CAMPO} - \text{SALDO FINAL}$$

### **10.3.6. Unidades experimentales**

El ensayo tuvo un diseño experimental completamente al azar, con tres repeticiones. Éste se ubicó en macroparcelas, bajo riego por aspersión, por el sistema de cobertura total con aspersores VYR 36 y espaciamiento de 12 m entre aspersores y 15 m entre laterales. Cada tratamiento tuvo iguales dimensiones, las cuales estuvieron limitadas por una línea de aspersores en ambos extremos. Además, entre cada tratamiento se dejó un espacio de iguales dimensiones, para evitar cualquier efecto del traslape del agua entregada por los emisores.

### **10.3.7. Frecuencia de riego**

La frecuencia de riego fue fija durante la temporada y se definió utilizando los datos entregados por laboratorio. Éstos fueron humedad a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, todos los cuales se calcularon a una profundidad de 30 cm. Además incluyó el criterio de riego, que consistió en la determinación de la humedad del suelo equivalente al 50% de la humedad aprovechable a 30 cm de profundidad.

### **10.3.8. Instalaciones**

#### **a) Rizotrones**

Las cámaras de observación de raíces o rizotrones fueron ubicadas en áreas representativas de cada tratamiento. Para su construcción se procedió a realizar excavaciones, de dimensiones 1,3 \* 1,0 \* 1,0 m, donde se ubicó un vidrio triple, cuadrículado con líneas, con una separación de 2,5 \* 2,5 cm. Éste se ubicó al costado de dicha excavación, paralelamente a una de las líneas de plantas. Las anteriores dimensiones proporcionaron un área de observación de 1,0 \* 1,0 m. El vidrio o ventana de observación estuvo cubierto permanentemente por un polietileno negro, excepto al momento de evaluar el crecimiento de raíces. El acceso a la cámara fue a través de una tapa desplegable que cumplió función de techo (Ibacache y Lobato, 1995) (Foto 10.1).





Foto 10.1. Vistas de cámara de observación de raíces o Rizotrón ya instalado.

#### b) Tubos de acceso a sonda de capacitancia “Diviner 2000”

Se ubicaron cuatro tubos de acceso por tratamiento, dichos tubos permitieron el acceso de la sonda de capacitancia, modelo *Diviner 2000*. La instalación se realizó mediante el kit de instalación propio del equipo. El principal cuidado fue la verticalidad de los tubos, los cuales contaron con dos tapas: una en el fondo del tubo y otra sobre éste, para evitar la entrada de agua u otros objetos extraños (Foto 10.2).



Foto 10.2. Kit de instalación y tubos de acceso instalados.

#### c) Evaporímetro de bandeja Clase A

Ésta fue ubicada dentro del predio, en un lugar cercano al ensayo (100 m), sobre una superficie con poca vegetación natural, plana, libre de otros



cultivos en un radio de 70 m, de dimensiones y estructuras según las descritas por Morillo-Velarde *et al.* (2001) (Figura 10.2).

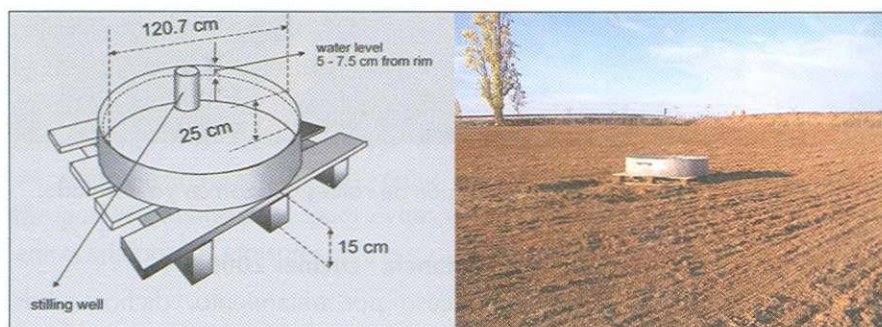


Figura 10.2. Evaporímetro de bandeja clase A tipo y bandeja instalada, respectivamente.

#### d) Estación Meteorológica Automática

Fue instalada dentro del predio, específicamente dentro del cultivo. Para esto se utilizó el equipo marca DAVIS modelo Vantage Pro, provisto de una serie de sensores: temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, y precipitación (Foto 10.3), ubicados a 2 m de altura, aproximadamente. Ésta fue situada a una distancia de 50 m de una fuente de energía eléctrica, la cual alimentó la batería de un teléfono celular (marca Motorola, empresa ENTEL PCS), además de una batería de 12v que suministró de energía al sistema. La energía del datalogger se administró a través de un panel solar. Finalmente la comunicación se realizó mediante telefonía celular y software propio del equipo, permitiendo así la recepción de datos desde Chillán, a cualquier hora e intervalos de tiempo deseado.

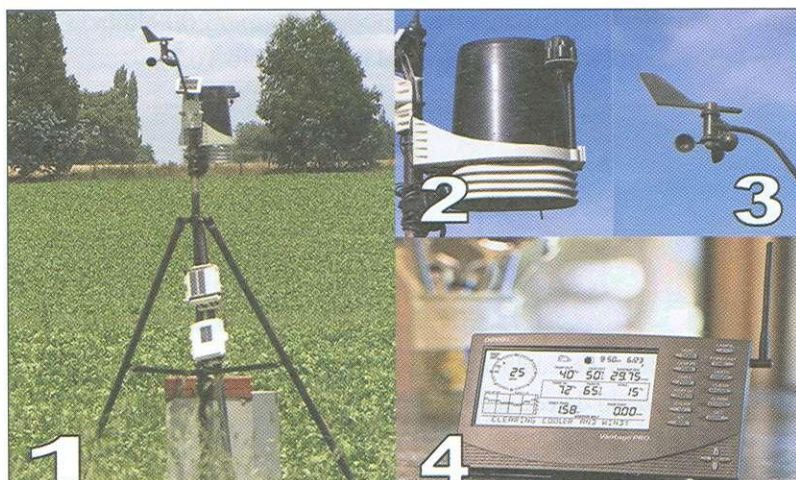


Foto 10.3. Estación Meteorológica Automática Davis, modelo Vantage Pro (1) y las diferentes estructuras que soportan a los sensores: pluviómetro, radiación solar, temperatura y humedad relativa del aire (2), velocidad y dirección del viento (3) y datalogger (4).

### 10.3.9. Recepción de datos meteorológicos

El equipo fue configurado para el almacenamiento de datos cada 15 minutos. Esto permitió que si por alguna circunstancia la comunicación no era posible, por ejemplo debido a fallas en la señal telefónica u otros imprevistos, la descarga de éstos fuera posible directamente en el predio. Las descargas de datos se realizaron diariamente, para así efectuar el posterior cálculo de  $ET_o$  y luego el balance hídrico diario.

## 10.4. EVALUACIONES

### 10.4.1. Humedad de suelo

Las mediciones fueron efectuadas, antes y después de cada riego, mediante el método gravimétrico, consistente en la toma de muestras de suelo con barreno y posterior secado en un horno a  $115^{\circ}\text{C}$  por 48 horas o hasta llegar a peso constante. Paralelamente se realizó un monitoreo del agua en el suelo,

utilizando una sonda de capacitancia, modelo Diviner 2000, a través de una serie de tubos de acceso instalados en el ensayo (Foto 10.4).



Foto 10.4. Muestreo de suelo en terreno para gravimetría (1), horno marca "MEMERT" (2) y sonda de capacitancia modelo "Diviner 2000" (3).

### 10.4.2. Resistencia difusiva

Las evaluaciones fueron semanales, antes y después de cada riego, a diferentes horas del día (7:00, 10:00, 12:00, 15:00 y 19:00 horas), mediante un porómetro de difusión marca Delta-T Devices, modelo AP4 (Foto 10.5). Para esto se eligieron, de manera aleatoria, tres plantas representativas de cada tratamiento, en las cuales se marcaron 3 hojas medias, adultas y expuestas a la luz. En dichas hojas se realizaron 3 mediciones, por el haz y por el envés, y fueron reemplazadas si presentaban daño, ya sea mecánico, por plagas, enfermedades o sencillamente por edad excesiva.



Foto 10.5. Porómetro de difusión estomática, marca Delta-T Devices, modelo AP4.

### **10.4.3. Crecimiento de raíces fibrosas**

Las evaluaciones se realizaron semanalmente a través de rizotrones. Éstas consistieron en el conteo del número total de intersecciones, entre las raíces y el cuadrículado del vidrio, lo cual permitió medir el crecimiento de las raíces durante todo el período de crecimiento del cultivo. Además, para realizar dichas mediciones, el vidrio fue dividido en tres secciones que representaron tres profundidades (0 a 30 cm, 30 a 60 cm y 60 a 90 cm), según la metodología descrita por Ibacache y Lobato (1995).

### **10.4.4. Peso de raíces y zona aérea e la planta**

En cada sector, donde se ubicó cada tratamiento, se procedió al muestreo semanal que correspondió a la extracción aleatoria de tres plantas representativas por tratamiento. Estas plantas fueron divididas en raíz sin corona y zona aérea. Luego, cada estructura fue limpiada y secada en un horno a 70°C durante 72 horas o hasta que alcanzó peso constante.

### **10.4.5. Índice de área foliar**

Las mediciones fueron semanales. Consistió en la división de la zona aérea de la planta en hojas y pecíolos, para luego dimensionar dichas hojas a través de un medidor foliar, marca LI-COR, modelo LI-3000 (en cm<sup>2</sup>), previamente calibrado. Esta área fue modificada según el marco de siembra, 0,5 \* 0,12 m. Así, luego se obtuvo la superficie de hoja expresada en m<sup>2</sup> de hoja por m<sup>2</sup> de suelo (IAF).

### **10.4.6. Rendimiento y calidad de raíces**

Al momento de la cosecha se procedió al muestreo aleatorio de plantas. Esto consistió en la extracción total de 45 m<sup>2</sup> por tratamiento. Luego se obtuvo el peso fresco de cada estructura, raíces sucias y hojas más coronas, y posterior determinación de impurezas y porcentaje de sacarosa en laboratorios de IANSA.

#### **10.4.7. Análisis de datos**

Se determinaron las diferencias entre los distintos parámetros evaluados para cada tratamiento mediante el programa SAS (Sistema de Análisis Estadístico), utilizando el test de Diferencia Mínima Significativa (DMS). Además, se correlacionaron los diferentes consumos hídricos dados por el evaporímetro de bandeja clase A y el obtenido a partir del modelo de Penman-Monteith.

### **10.5. RESULTADOS**

#### **10.5.1. Riego**

Debido a las condiciones pluviométricas de los meses de octubre y noviembre, los riegos se postergaron hasta la segunda semana de diciembre. Durante toda la temporada se mantuvo una frecuencia fija de 3 y 4 días, efectuándose así, los días lunes y jueves, en ambos tratamientos, con un número total de 35 riegos en este período. El volumen de agua total aplicada alcanzó un promedio de  $6.611 \text{ m}^3/\text{ha}$  y se observó una mayor aplicación en el tratamiento. Es decir, se determinó que la evapotranspiración de referencia a través del modelo de Penman-Monteith fue  $10 \text{ m}^3/\text{ha}$  mayor.

#### **10.5.2. Balance hídrico v/s Gravimetría**

En ambos casos, tanto en el testigo (Figura 10.3) como en el tratamiento (Figura 10.4), se observa una evolución de la humedad del suelo, tanto el estimado por el balance hídrico, como el calculado con el método gravimétrico que fluctúa dentro del rango entre capacidad de campo, línea verde y criterio de riego, línea amarilla. En el caso del testigo se encuentran valores de gravimetría relativamente mayores a los del balance, lo cual se pudo deber básicamente a errores de muestreo.



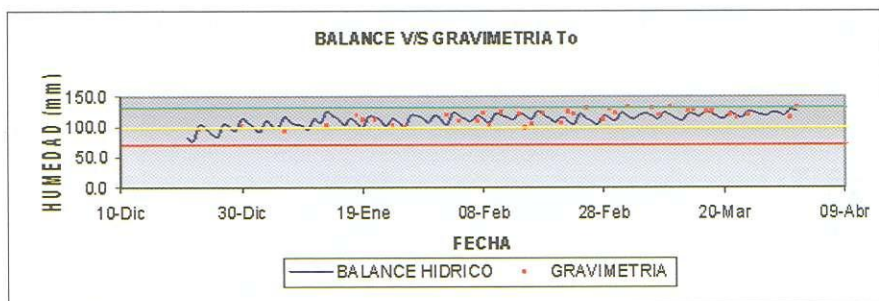


Figura 10.3. Evolución de la humedad del suelo en el testigo, estimada por el balance hídrico, y la calculada con el método gravimétrico.

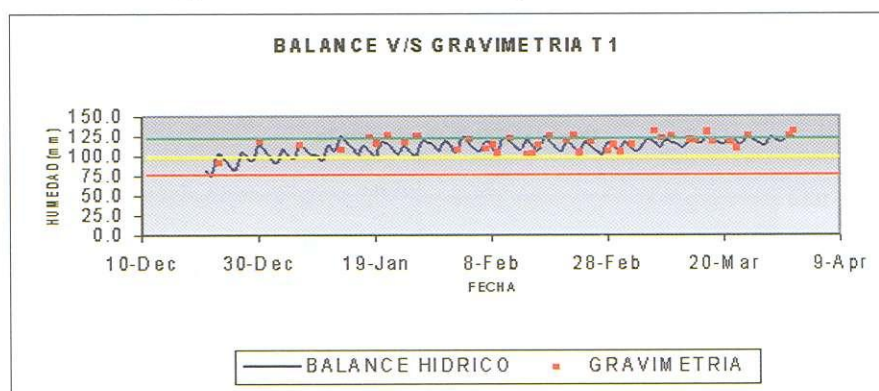


Figura 10.4. Evolución de la humedad del suelo en el tratamiento, estimada por el balance hídrico y la calculada con el método gravimétrico.

### 10.5.3. Gravimetría v/s Sonda FDR

Debido a que el equipo no se calibró para este tipo de suelo específico y se usó la calibración de fábrica, los datos obtenidos son relativos y no absolutos o reales del contenido de agua del suelo, pero sí fue una herramienta muy útil a la hora de tomar decisiones. En ambos tratamientos se subestimó la humedad con respecto a la gravimetría. Esta subvaloración en el Testigo (To) alcanzó un promedio de 46 mm (Figura 10.5) y una correlación de datos regular ( $r^2=0.56$ ) (Figura 10.6) y en el Tratamiento (T1) de 41 mm (Figura 10.7) y una correlación baja ( $r^2=0.20$ ) (Figura 10.8). Lo anterior pudo tener como causa la irregular instalación de los tubos de acceso de la sonda, donde

podieron existir piedras o masas de aire alrededor del tubo que pudieron afectar las mediciones.

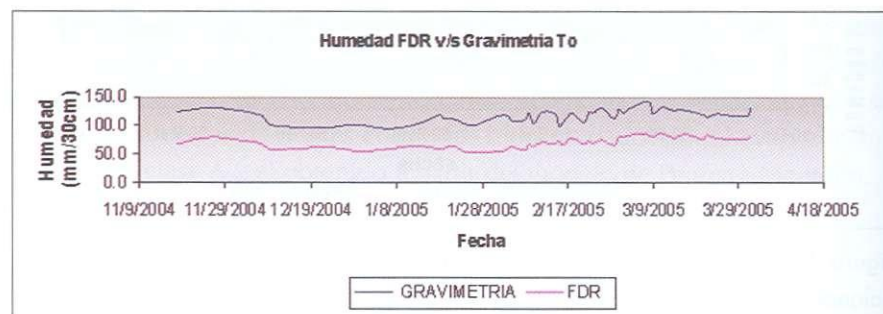


Figura 10.5. Evolución del contenido de agua en el suelo del Testigo (To) estimado con sonda FDR y calculado con gravimetría.

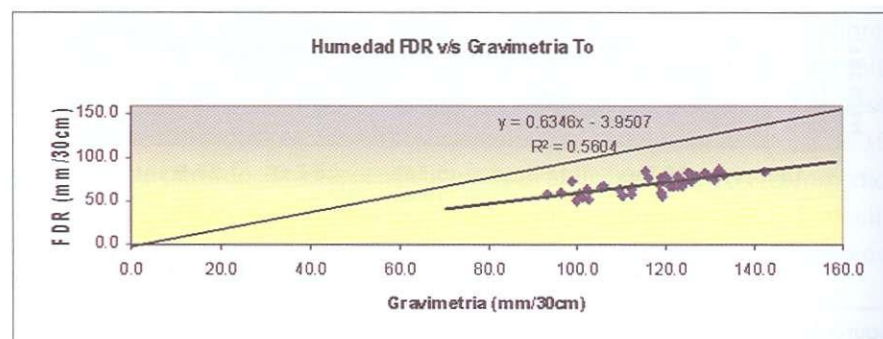


Figura 10.6. Correlación de contenidos de agua en el suelo del Testigo (To) estimado con sonda FDR y calculado con gravimetría.

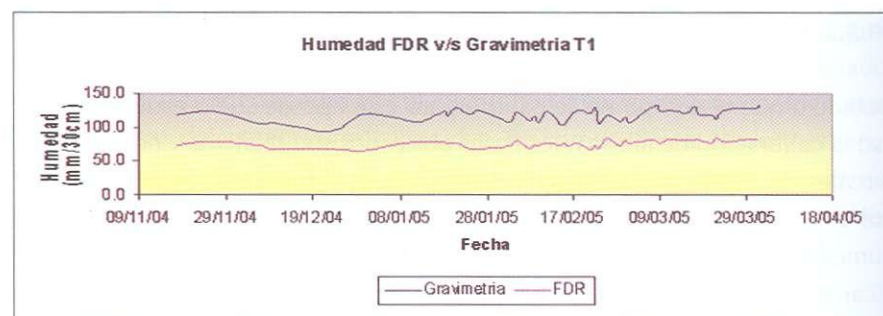


Figura 10.7. Evolución del contenido de agua en el suelo del Tratamiento (T1) estimado con sonda FDR y calculado con gravimetría.



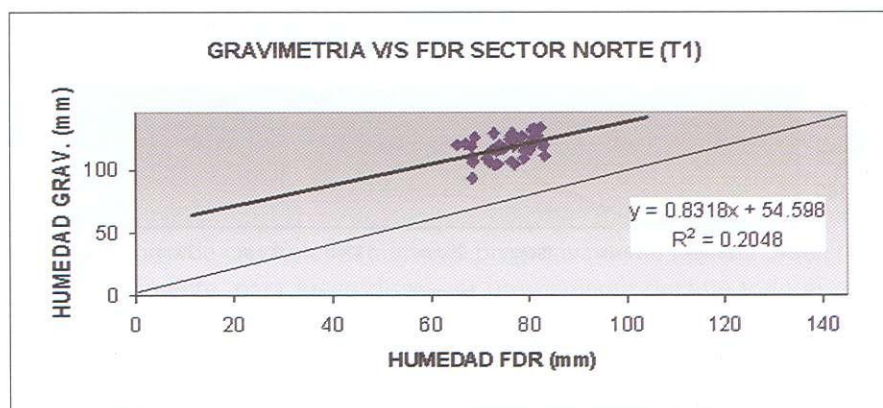


Figura 10.8. Correlación de contenidos de agua en el suelo del Tratamiento (T1) estimado con sonda FDR y calculado con gravimetría.

#### 10.5.4. Materia Seca (Figura 10.9)

En los dos tratamientos, la dinámica de acumulación de materia seca es bastante similar, pero muy distintas entre las diferentes estructuras (Raíz y Hoja+Corona). Al comienzo presentan una mayor acumulación de las hojas y coronas (H+C), pero a partir de la segunda quincena de diciembre, las raíces las comienzan a superar. La materia seca en raíces tiene un aumento sostenido, siendo mayor en la época comprendida entre inicios de diciembre y mediados de enero. A partir de este momento sigue, pero de forma más estabilizada, llegando a cosecha con un peso cercano a los 300 g/raíz. Estos valores son levemente mayores en el caso del T1. Para el caso de hojas y coronas, la acumulación es mayor que las raíces en un principio, pero luego se ve ampliamente superada para ambos tratamientos. El pick de acumulación de materia seca se alcanza, para ambos a fines de enero, con un promedio de 110 g/planta. Esto es cuando el cultivo alcanza el cierre de hileras y máximo IAF. Luego se observa una disminución paulatina, probablemente debido a una degradación de éstas y posterior muerte.

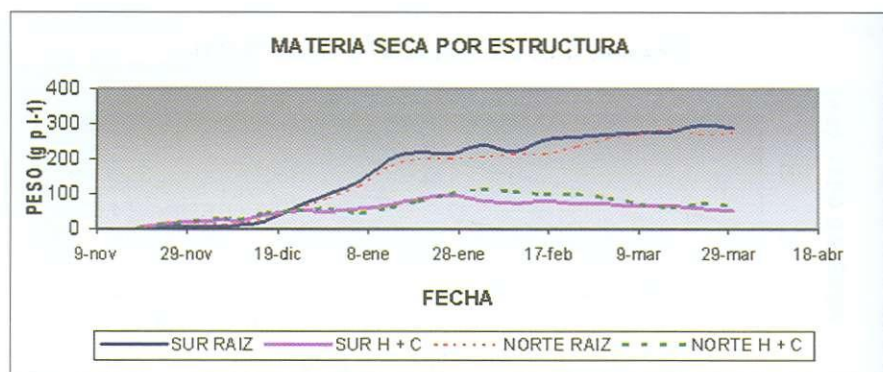


Figura 10.9. Acumulación de materia seca para ambos tratamientos, por estructura.

#### 10.5.5. Índice de área foliar (Figura 10.10)

En ambos tratamientos la evolución es relativamente similar, siendo en un comienzo mayor en el T1 hasta fines de enero, cuando logran el pick de 5. Luego, en la segunda mitad del desarrollo el To lo supera, pero finalmente ambos terminan con valores parecidos, cercanos a 3. Cabe señalar que el óptimo de IAF se logra con valores entre 3-4, lo cual en este caso se alcanzó a fines de diciembre-primer quincena de enero.

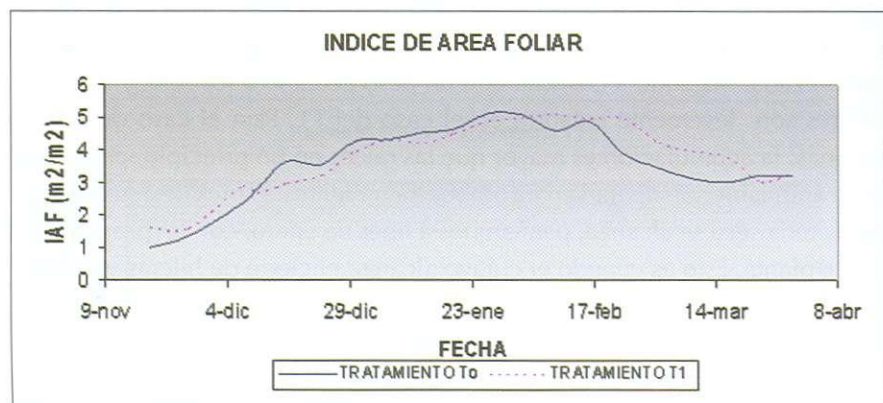


Figura 10.10. Índice de área foliar acumulado en la temporada para ambos tratamientos.

### 10.5.6. Crecimiento de raíces

En ambos casos la evolución fue similar, produciéndose la mayor exploración de raíces durante todo el mes de enero. En un comienzo esta exploración de raíces observadas a través de los rizotrones, tuvieron un débil aumento. En el caso del To (Figura 10.11), hasta mediados de diciembre, en las dos primeras estratas, la tasa de crecimiento aumentó progresivamente hasta el 5 de enero aproximadamente, para luego disminuir bruscamente durante todo el resto de enero, estabilizándose luego desde mediados de febrero. En cuanto a la tercera estrata medida, ésta fue de mucho menor crecimiento y con picks distintos a los descritos anteriormente, ya que éste ocurrió a mediados de enero. En el caso del T1 (Figura 10.12), el comienzo también fue progresivo en las dos primeras estratas y lento hasta mediados de diciembre, logrando el pick a fines de este mes. Así se inició la disminución, estabilizándose también a mediados de febrero. En la tercera estrata, el crecimiento también fue mucho menor con pick a mediados de enero. Es bueno señalar que en esta medición pudieron existir alteraciones, debido que, para instalar el vidrio de la cámara de observación, fue necesario realizar un movimiento del suelo contiguo al vidrio que, en definitiva, es donde son visualizadas las raíces.

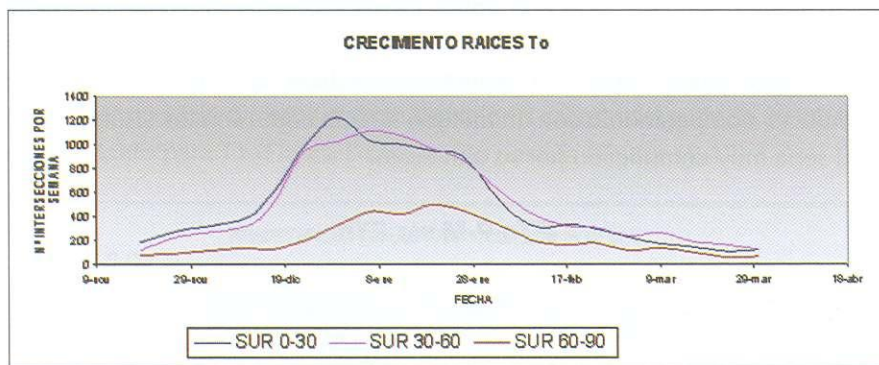


Figura 10.11. Crecimiento de raíces fibrosas en tres estratas, para el To.

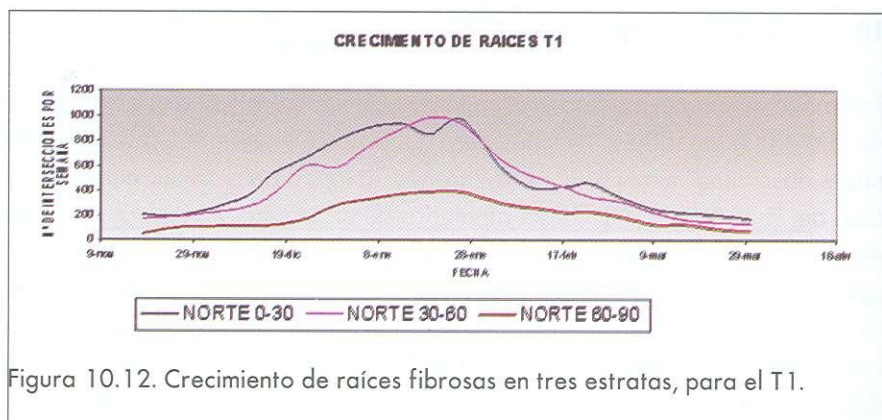


Figura 10.12. Crecimiento de raíces fibrosas en tres estratas, para el T1.

#### 10.5.7. Evapotranspiración Potencial (Eto): Penman-Monteith v/s Evaporímetro de bandeja.

Las evapotranspiraciones estimadas con ambos métodos tienen una evolución similar en el tiempo, siendo mayor a fines de enero y disminuyendo hasta abril. Si bien, ambas curvas son similares y suman en total valores parecidos (Figura 10.13), éstas no presentan una correlación alta, sino más bien regular (Figura 10.14). Pero debido a que ambos son métodos de estimación indirecta, no se pueden comparar como tal, motivo por el cual su comparación sólo se puede hacer mediante los rendimientos del cultivo para ambos casos o, en su defecto, comparándolo con un método directo como son los Lisímetros, lo cual sería muy complicado por su alto costo.

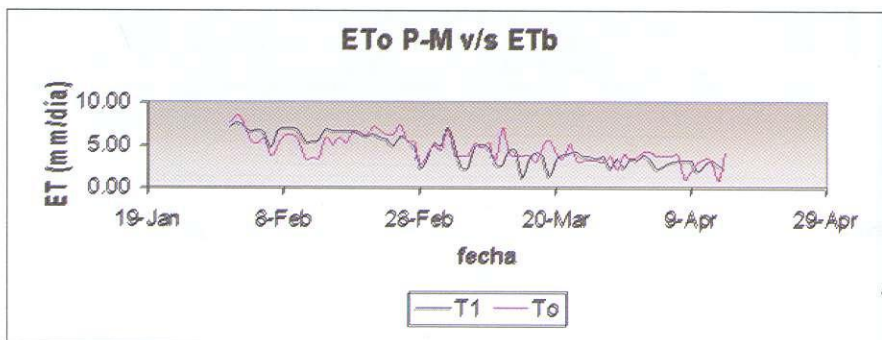


Figura 10.13. Evolución de evapotranspiraciones potenciales estimadas según los métodos de Penman-Monteith (T1) y evaporímetro de bandeja (T0).



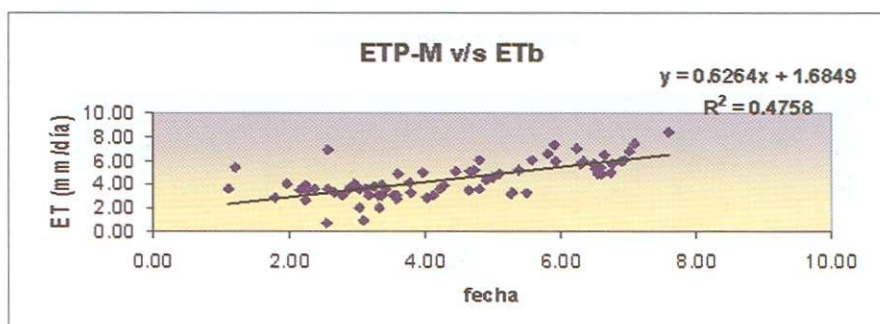


Figura 10.14. Comparación de evapotranspiraciones estimadas según los métodos de Penman-Monteith (T1) y evaporímetro de bandeja (To).

### 10.5.8. Resistencia Difusiva

En ambos tratamientos y en ambas caras de la hoja, considerando los promedios totales por hora de medición (7:00, 10:00, 12:00, 15:00 y 19:00 hrs.), se obtuvo que la resistencia estomática a la difusión de vapor de agua aumenta progresivamente a medida que transcurre el día, moviéndose en un rango entre 1 y 7 seg/cm (Figura 10.15). Además, en ambos tratamientos, las mediciones tanto por el haz como por el envés, no permiten para las condiciones de este ensayo su utilización como indicador de riego, ya que no existe una marcada diferencia entre los valores antes y después de efectuado el riego, tanto para T1 (Figura 10.16) como para To (Figura 10.17).

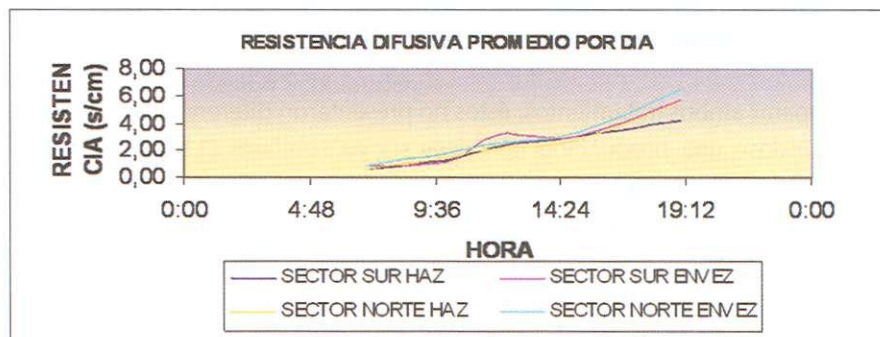


Figura 10.15. Resistencia difusiva promedio por día por haz y envés de la hoja en ambos tratamientos.

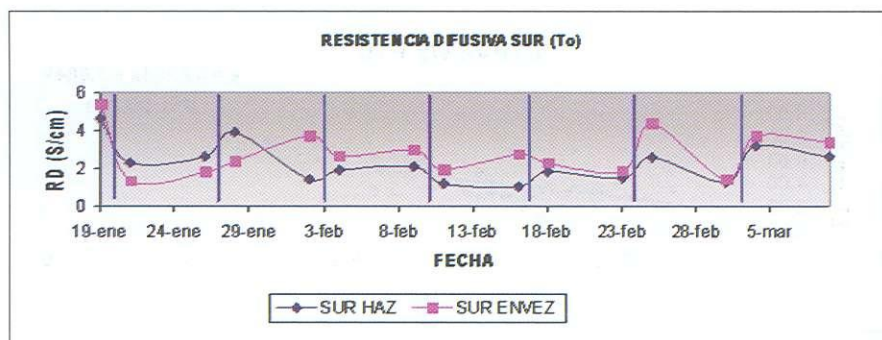


Figura 10.16. Resistencia difusiva promedio antes y después del riego, por haz y envés de la hoja, para el Testigo (To).

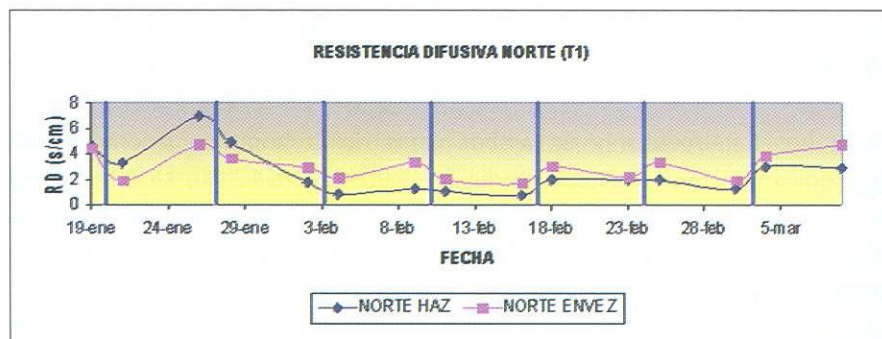


Figura 10.17. Resistencia difusiva promedio antes y después del riego, por haz y envés de la hoja, para el Tratamiento (T1).

### 10.5.9. Parámetros de Rendimiento (Figura 10.18)

Al comparar ambos tratamientos, éstos no presentaron diferencia significativa, observándose una producción de raíces sucias similares (112.22 y 108.56 ton/ha, respectivamente) al igual que el porcentaje de impurezas (2,1 y 2,6%, respectivamente), obteniéndose en el To, 109.21 ton/ha de raíces limpias y 18.28 ton/ha de sacarosa. En el T1, 105.53 ton/ha de raíces limpias y 18.92 ton/ha de sacarosa. Lo anterior se traduce en un rendimiento agrícola de 114.27 ton/ha de raíces limpias base 16% en el To y 118.23 ton/ha en el T1.

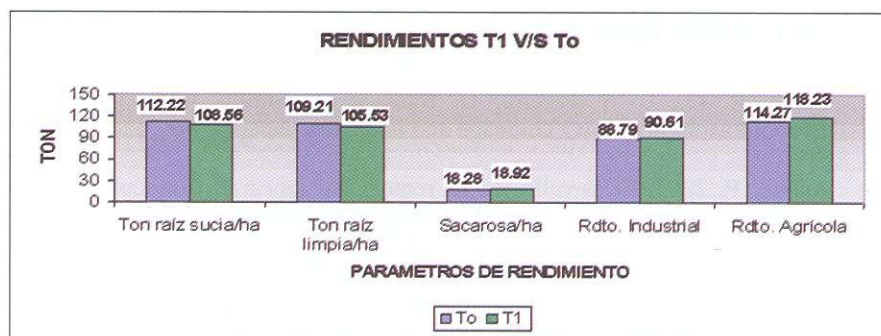


Figura 10.18. Parámetros de rendimiento evaluados en ambos tratamientos.

## 10.6. CONCLUSIONES

Para las condiciones de este ensayo se puede concluir que:

- Con los datos entregados por una EMA, en las condiciones edafoclimáticas de El Carmen es posible realizar una programación de riego adecuado.
- Mediante la programación de riego con P-M se obtienen resultados óptimos, que no difieren estadísticamente con los obtenidos mediante una bandeja de evaporación.
- La utilización del porómetro en remolacha de difusión, no es una alternativa viable para su uso como indicador de riego, por lo que se hace necesario el estudio con otros instrumentos, como por ejemplo la cámara de presión Scholander.
- Los datos obtenidos con la sonda FDR no entrega valores reales, pero sí lo hace entregando información cualitativa del comportamiento del agua del suelo, pudiendo con esto tomar una decisión con respecto al riego de un determinado cultivo.



## 10.7. LITERATURA CITADA

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration. FAO Drainage and irrigation paper N° 56.

Astete, P. 2003. Desarrollo de la remolacha azucarera, un cultivo agradecido. Gestión & Tecnología (Chile). (Octubre) pp. 23-26.

Campos, J. A. 2003. Manejo de agua en remolacha bajo riego por cinta de goteo. Memoria de título. Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción. Fac. Ing. Agric. Chillán, Chile.

CIREN (Chile). 1999. Estudio agrológico VIII Región. Descripciones de suelos materiales y símbolos, Publicación CIREN N° 121. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Santiago, Chile.

Del Pozo, A., P. Del Canto S. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. INIA. Chillán, Chile.

Della Maggiora A. I., J. M. Gardiol, A. I. Irigoyen e I. Echarte. 1997. Estimación de la evapotranspiración de referencia con el método de Penman-Monteith en Balcarce. Rev. Fac. Agron. 17 (1): 123-126.

Ferreira R., N. Fritsch, C. Navarrete y J. Peralta. 1990. Programación del riego para el cultivo del ajo. Agric. Tec. (Chile). 50 (4): 337-342.

Gurovich, L. A. 2001. Requerimientos de agua de los cultivos. pp. 107-154. Riego superficial tecnificado. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Holzapfel, E., G. Figueroa, A. Venegas y R. Matta. 1995. Requerimientos hídricos en manzanos adultos. Agro-Ciencia. 11 (1): 49-54.

Ibacache, A., A. Lobato. 1995. Períodos de crecimiento de raíces en vid. Rev. Frutícola. 16 (1): 23-26.

Márquez, L. 2004. Programación de riego en remolacha utilizando estaciones meteorológicas automáticas. Memoria de Título. Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción. Fac. Agronomía. Chillán, Chile.

Martín De Santa Olalla, F., J. A. De Juan Valero. 1993. Agronomía del riego. Mundiprensa. Madrid, España.

Morillo-Velarde R., H Velicia y J. C. Martínez. 2001. Técnicas de riego en la remolacha azucarera. Caja España. Valladolid, España.

ODEPA (Chile). 2005. Estadísticas macrosectoriales y productivas. [en línea] <http://www.odepa.gob.cl>. [consulta: 13/07/05].

Ortega, S. O., R. Calderón, C. Acevedo y S. Fuentes. 2000. Estimación de la evapotranspiración diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman-Monteith. *Cien. Inv. Agrar.* 27 (2): 91-96.

Ortega, S. O., R. Cuenca, B. Solíz y C. Ortíz. 1996. Evaluación del calor latente usando la ecuación de Penman-Monteith, con un valor variable de la resistencia cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua. *Cien. Inv. Agrar.* 23 (2-3): 113-118.

Reyes, C. 2001. Evaluación del crecimiento radicular, vegetativo y reproductivo en cerezo (*Prunus avium* L.) con y sin riego. Memoria de título. Ing. Agrónomo. Universidad de Concepción. Fac. Agron. Chillán, Chile.

# Nuevos Desafíos



## CAPÍTULO 11

### SISTEMA DE MONITOREO DE PLANTA

*Autores*

**Gabriel Selles van Sch.**

Ing. Ag. Dr. Instituto de  
Investigaciones Agropecuarias.  
INIA, La Platina.  
gselles@inia.cl

**Raúl Ferreyra Espada**

Ing. Ag. M. Sc. Instituto de  
Investigaciones Agropecuarias.  
INIA, La Platina.  
rferreyr@inia.cl

El suelo, la planta y la atmósfera constituyen un sistema continuo, en el cual el suelo proporciona un anclaje mecánico a las plantas, siendo el medio en que se almacena el agua y el oxígeno que absorben las raíces. La atmósfera constituye una fuente de demandas de aguas ilimitada.

La planta constituye una unidad conductora entre el suelo y la atmósfera, ya que absorbe el agua del suelo y ésta circula por el xilema y se pierde a través de los estomas de las hojas hacia la atmósfera, por un proceso conocido como transpiración. El flujo de agua se produce en respuesta a un gradiente de energía o de potenciales que existen entre el suelo y la atmósfera, de acuerdo a la siguiente ecuación y representado por la Figura 11.1.

$$T = (\Psi_h + \Psi_a) / R_{est} = (\Psi_s + \Psi_h) / R_{sp}$$

Donde  $T$  es la transpiración,  $\Psi_a$ ,  $\Psi_h$  y  $\Psi_s$  son los potenciales totales del agua en la atmósfera, hoja y suelo, respectivamente;  $R_{est}$  es la resistencia estomática; y  $R_{sp}$  es la resistencia a la circulación del agua entre el suelo y la planta (resistencia de raíces y de los sistemas conductores hasta llegar a las hojas).

En la Figura 11.1 se presentan entre paréntesis los potenciales hídricos representativos en las diferentes partes del sistema.

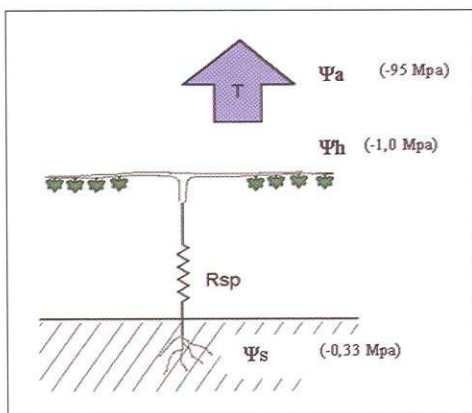


Figura 11.1. Flujo transpiratorio en respuesta a gradientes de potenciales hídricos en el sistema suelo planta atmósfera.

La transpiración constituye la fuerza motriz del ascenso de agua en las plantas. A nivel de las hojas, y en respuesta al gradiente de potencial hídrico entre la atmósfera y la hoja, se produce salida de agua desde éstas, en forma de vapor, a través de los estomas, disminuyendo su potencial hídrico. Esta reducción de potencial hídrico foliar aumenta el gradiente entre la hoja y el suelo, lo que provoca el flujo de agua desde la zona de raíces. En la medida que la disponibilidad de agua del suelo disminuye, (disminuye el potencial mátrico y la conductividad hidráulica del suelo), el flujo de agua hacia la planta es cada vez menor, llegando un momento en que la absorción no puede igualar a la transpiración. Así se produce un déficit hídrico en la planta, lo que induce un cierre estomático. Por otra parte, los excesos de agua en el suelo provocan problemas de aireación, afectando el metabolismo radicular, lo que también afecta el desarrollo del cultivo en general. Por lo tanto, es necesario mantener niveles de humedad adecuados en el suelo para satisfacer las necesidades transpiratorias de las plantas y no provocar déficit hídricos que afecten su crecimiento y desarrollo (Figura 11.2). Los umbrales de riego son más estrechos en cultivos de arraigamiento superficial y de mayor demanda evaporativa.

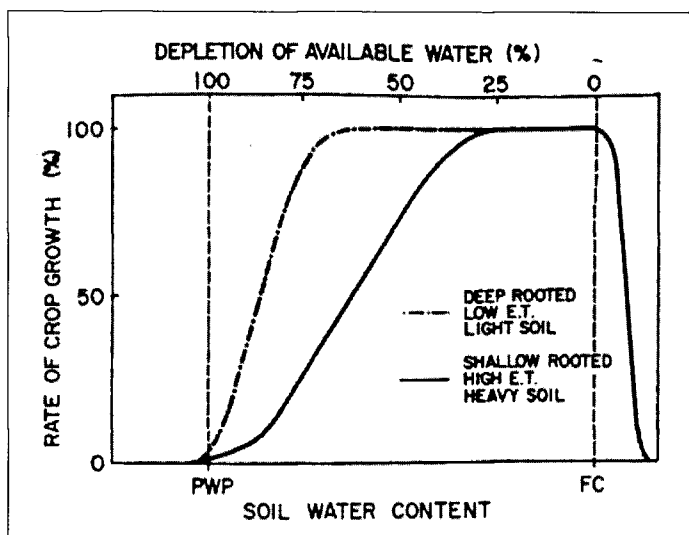


Figura 11.2. Relación entre el contenido de humedad del suelo y el desarrollo del cultivo.

- La aplicación de cantidades de agua concordantes con los requerimientos de las plantas y la eficiencia de aplicación del sistema de riego que se utilice, permite ahorrar agua y energía, controlar las pérdidas de nutrientes por lixiviación, y aumentar los rendimientos y calidad de la producción. Por otra parte, el manejo del agua a nivel predial y la calidad del agua de riego son aspectos importantes en el establecimiento de las buenas prácticas agrícolas. De hecho, las Buenas Prácticas Agrícolas establecidas en el EUREPGAP (Good Agricultural Practices, del Euro Retailer Grups), consideran dentro de su protocolo la predicción de los requerimientos de riego.

### **11.1. CONTROL DEL RIEGO**

Así como los programas fitosanitarios se apoyan en el monitoreo de plagas, o en los programas de fertilización se realizan análisis foliares y de suelo, el programa de riego también deben ser controlado para poder ajustar los tiempos y frecuencias a las necesidades específicas del cultivo y a las características de los suelos. El balance que se realiza a través de un registro de evapotranspiración no asegura que esté cumpliendo en la realidad. Es posible que esté subestimado o sobrestimando la evaporación del cultivo, o que la velocidad de infiltración de agua en el suelo haya sufrido variaciones debido a depósitos superficiales o compactación, o que por algún otro motivo no esté regando con la cantidad correcta (obturación de emisores en riego localizado). Debido a esto, es necesario contar con mecanismos de control o monitoreo del riego. El primer mecanismo de control es la evaluación periódica de la descarga, presiones y uniformidad del equipo de riego.

Los otros mecanismos son el control del estado hídrico del suelo y/o el estado hídrico de la planta. Los métodos basados en parámetros obtenidos de las plantas tienen la ventaja de que integran el contenido de humedad de toda la zona radical, pero requieren de instrumentos especiales y una interpretación más cuidadosa.



## **11.2. CONTROL DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO**

El control de la humedad del suelo permite conocer el nivel de disponibilidad de agua en forma cualitativa o cuantitativa, esto último midiendo el contenido de humedad (gravimétrico o volumétrico) o el potencial mátrico del agua en el suelo. El control de humedad permite determinar la profundidad del riego y determinar si éste es excesivo o deficitario. En el caso de riegos localizados permite, además, definir y conocer el comportamiento del bulbo húmedo que generan los emisores.

Es necesario indicar que, previo al establecimiento de cualquier sistema de control, se debe conocer la variabilidad espacial de los suelos, para lograr una clara interpretación de los resultados que se obtengan y sirvan como una herramienta adecuada para mejorar el manejo de riego de los cultivos.

### **11.2.1. Uso de barrenos y calicatas**

Entre los métodos de control de humedad del suelo, el más sencillo es el control sensorial del perfil por medio de calicatas o barreno. Consiste en tomar muestras de suelo a distintas profundidades y observar el contenido aparente de humedad. Este método es de muy fácil aplicación, pero requiere de cierta experiencia.

El uso de calicatas es siempre recomendable, pues permite una visualización más completa de la humedad del suelo, y además permite observar el estado general del suelo y del desarrollo de raíces para comprobar la calidad del riego que se está utilizando. Las calicatas deben ser anchas y profundas, de manera que se pueda apreciar toda la zona de raíces (Foto 11.1).



Foto 11.1. Evaluación de humedad de suelo mediante inspección de calicata.

### 11.2.2. Uso de instrumentos

El control de humedad del suelo se puede evaluar mediante el uso de instrumentos que pueden cuantificar, ya sea la energía de retención del agua en el suelo, o potencial mátrico, o instrumentos que pueden cuantificar el contenido de humedad volumétrico del suelo. Ambos parámetros están íntimamente relacionados. A medida que disminuye el contenido de agua del suelo, aumenta la energía de retención de éstas por parte de la matriz del suelo (disminuye el potencial mátrico). Esta relación depende de las características texturales y estructurales del suelo (Figura 11.3).

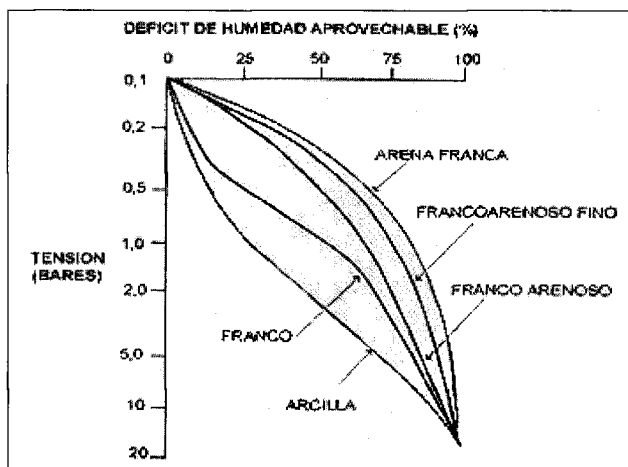


Figura 11.3. Relación entre el contenido de humedad del suelo y la energía de retención del agua (Potencial mátrico).

Entre los instrumentos que miden la energía del agua en el suelo se encuentran los tensiómetros, ampliamente conocidos, y los bloques de resistencia eléctrica (Water Marquer). Los tensiómetros miden la energía de retención del agua en el suelo hasta 60 a 70 kPa solamente (60 a 70 centibares, cb.). Sin embargo, en este rango se encuentra más del 50% de la humedad aprovechable del suelo. Los Watermarquer registran valores mayores, pero han mostrado muy poca sensibilidad a rangos altos de humedad en el suelo, que es el caso normal en riego localizado.

Son instrumentos útiles, aunque requieren de cuidado en su colocación y se debe determinar claramente su ubicación respecto del sistema radicular de las plantas y realizarles una adecuada mantención.

Dentro de los equipos que miden humedad de suelo se encuentran sensores conocidos con el nombre de sondas capacitivas o FDR.

El FDR (Frequency Domain Refractometry) (Foto 11.2) es un instrumento que basa su medición en la constante dieléctrica del suelo, la cual varía en función del contenido de humedad de éste. La constante de un suelo seco es del orden de 4 a 10, en cambio la del agua pura es del orden de 80. El sensor

está constituido por una sonda con un par de electrodos (anillos circulares) conectados a un oscilador. Cuando esta sonda se introduce en el suelo, a través de un tubo de acceso de PVC, el campo eléctrico se activa utilizando una radio frecuencia y su variación registra el contenido de humedad.

Los instrumentos traen una curva de calibración incorporada. Pero se pueden presentar errores de medición en suelos con contenidos salinos sobre 1 dS/m o suelos heterogéneos. Es muy importante que los tubos de acceso de PVC queden muy bien ajustados al perfil de suelos para obtener lecturas adecuadas, ya que bolsones de aire entre el tubo y el suelo invalidan las lecturas. Es posible trabajar con las curvas de calibración estándares que traen los equipos para diferentes texturas de suelo: no obstante, es indispensable calibrar, al menos, las curvas estándar con el contenido de humedad a capacidad de campo de cada suelo, a objeto de tener un patrón de comparación real de las lecturas, determinando si la humedad está por sobre o bajo este valor y cuánto es esta diferencia. El contenido de humedad a capacidad de campo se puede obtener mediante mediciones de humedad al término del período de lluvias invernales, o bien realizando pretils en torno a los tubos, los cuales se inundan con abundante agua para saturar el perfil de suelo. Se deja drenar durante 48 a 72 horas y luego se mide el contenido de humedad con la sonda (para evitar la evaporación directa el pretil se cubre con un mulch de paja).



Foto 11.2. Sonda de capacitancia, modelo *DIVINER 2000*.

Independiente del sistema de medición de humedad que se utilice, es necesario tener presente la variabilidad espacial de la distribución de humedad que se produce tanto al interior del bulbo húmedo generado por el gotero como entre los diferentes sectores del campo, para definir el número y posición de los puntos de medición de humedad, de tal manera que éstos sean representativos. En cada estación de control de humedad, a lo menos se debieran considerar tres puntos de medición: al centro de la línea de plantas, al centro de la entre hilera y en un punto intermedio (Figura 11.4). Es recomendable, previo a la colocación de los instrumentos (tensiómetros o tubos para FDR), ver en calicatas la forma y distribución de la humedad del bulbo húmedo y dónde se concentran las raíces.

De acuerdo a la Figura 11.4, el contenido de humedad se mantiene alto sobre la hilera; sin embargo, existe una disminución progresiva de humedad en las otras dos posiciones, lo que señala la gran extracción de agua que realizan las raíces en esta zona y la necesidad de ampliar el bulbo de mojamiento (Figura 11.5). Los contenidos de humedad varían desde el centro del bulbo hacia la periferia del mismo. Las diferentes líneas representan la distribución del contenido de humedad

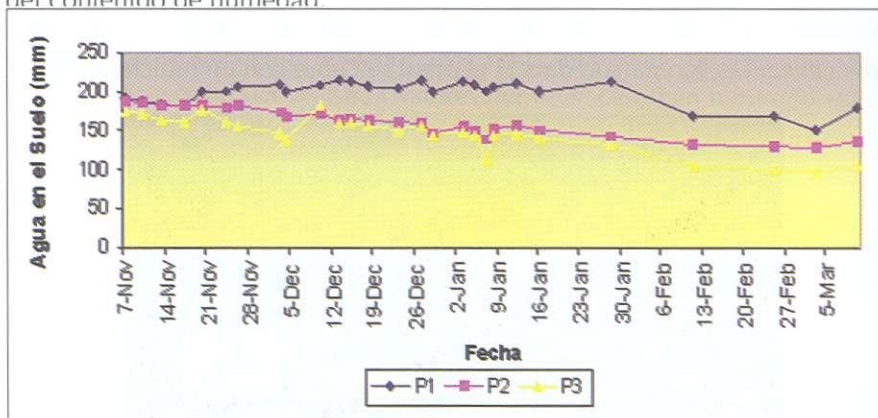


Figura 11.4. Lecturas de humedad de suelo con un FDR. P1 corresponde a la humedad medida sobre la hilera de plantas, P2 a la humedad medida a 70 cm de la hilera de plantas y P3 a la humedad medida al centro de la entre hilera.



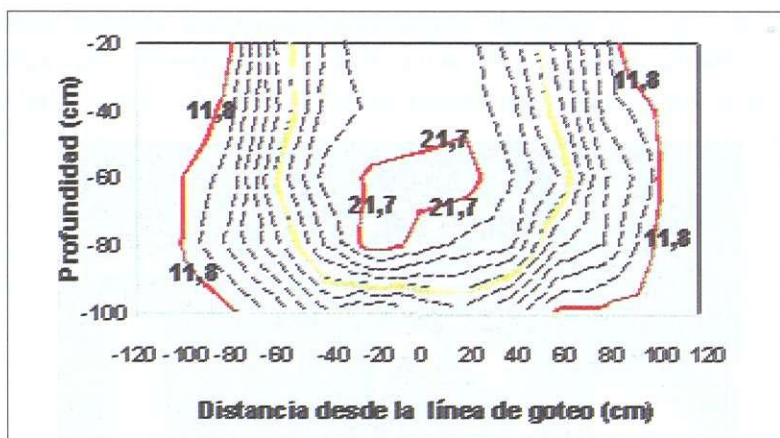


Figura 11.5. Distribución de la humedad del bulbo de un sistema de riego por goteo.

### 11.3. CONTROL DEL ESTADO HÍDRICO EN LA PLANTA

Otra forma de evaluar si los riegos se están realizando en forma adecuada es medir el estado hídrico de las plantas. Éstos tienen la ventaja de que integran el contenido de humedad del suelo disponible en toda la zona radicular del cultivo y las condiciones de demanda evaporativa imperantes en el momento de la medición.

El estado hídrico de la plantas se puede medir evaluando el potencial hídrico xilemático, que es un método rápido y sencillo, o bien realizando un seguimiento continuo de otro indicador como es la microvariación diámetro de los troncos, medida con dendrómetros.

#### 11.3.1. Potencial hídrico xilemático

El potencial xilemático corresponde a la tensión con que se encuentra el agua en el xilema de la planta y se mide en unidades de presión, normalmente megapascal (MPa). Los valores medidos se expresan en términos negativos,

ya que el agua en el xilema de las plantas se encuentra a presiones inferiores a la atmosférica. La tensión del agua en el xilema se puede medir con una cámara de presión conocida también con el nombre de bomba Scholander (Figura 11.6)

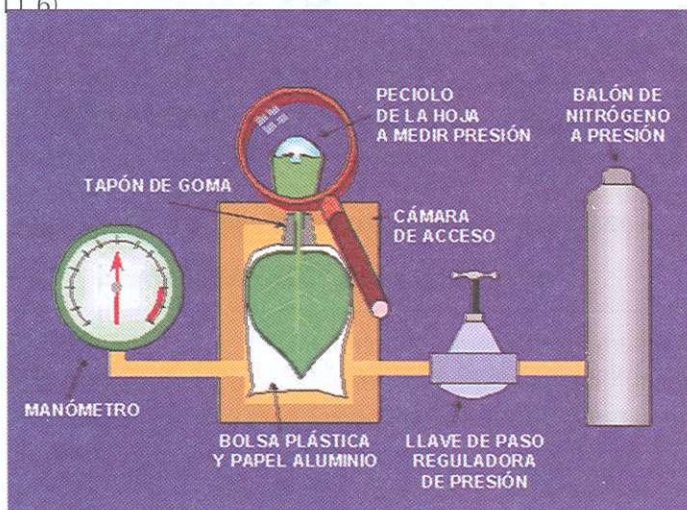


Figura 11.6. Representación esquemática de una cámara de presión.

Existen dos técnicas de medición, una que permite medir el potencial xilemático ( $\Psi_x$ ) y otra que mide el potencial foliar ( $\Psi_f$ ). Para obtener el potencial xilemático ( $\Psi_x$ ) es necesario envolver las hojas en una bolsa plástica y papel de aluminio, para bloquear la transpiración y radiación solar. Luego de dos horas, las hojas envueltas se cortan al nivel del pecíolo y se colocan (sin quitar el envoltorio) al interior de la cámara y se aplica una presión hasta que aparezca jugo xilemático en el extremo del pecíolo cortado, lo cual se detecta por observación visual, mediante una lupa. Esta presión es equivalente a la tensión a que se encuentra el agua en el xilema previo al corte y corresponde al potencial hídrico del xilema de la planta. Para realizar estas mediciones, se requiere especial cuidado en el muestreo y en el tiempo transcurrido entre el corte y la medición de las hojas, para que no se deshidraten durante la manipulación. Es posible realizar varias



repeticiones, de acuerdo a variedades y tipos de suelo.

El potencial foliar ( $\Psi_f$ ) se mide en hojas que transpiran. Para  $\Psi_f$  la hoja se cubre sólo con una bolsa de polietileno inmediatamente antes de realizar la medición, para evitar la deshidratación en la cámara.

Durante el día, la tensión de la savia aumenta como consecuencia del aumento en la demanda evaporativa de la atmósfera, por lo cual el potencial xilemático disminuye, llegando a su punto mínimo cerca del medio día (Potencial mínimo) y a su valor más alto antes de amanecer (Potencial de base), cuando no hay evaporación (Figura 11.7).

Por lo anterior, es importante realizar las mediciones en las horas donde existan algunos valores estándares de comparación, para la interpretación correcta de los potenciales xilemáticos. Lo estándar es medir el potencial xilemático (hojas cubiertas) al mediodía (entre las 14 y 16 h), en días despejados.

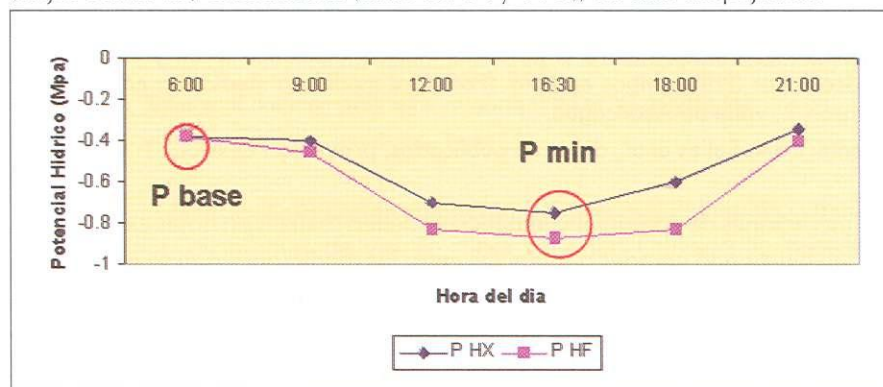


Figura 11.7. Evolución diaria del potencial hídrico xilemático (PHX) y del potencial hídrico foliar (PHF) en vides de mesa variedad Crimson Seedless (valle de Aconcagua 3 de diciembre 2002).

Los valores que se obtienen de mediciones de  $\Psi_f$  son más negativos que los que se obtienen de mediciones de potencial xilemático (Figura 11.8). Por otra parte, las evidencias experimentales existentes muestran que las mediciones de potencial xilemático son menos variables, representando

mejor la condición hídrica del árbol. Además permiten determinar con mayor precocidad posibles déficit hídricos que se están generando, de tal manera que en los últimos años las mediciones se realizan en hojas cubiertas.

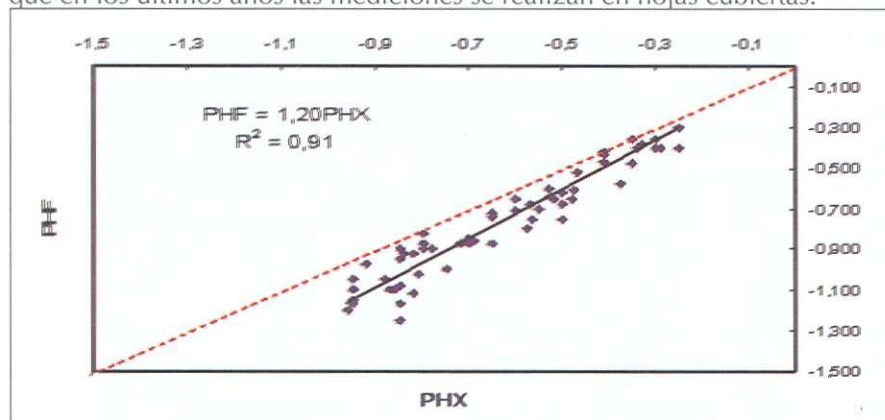


Figura 11.8. Relación entre el potencial hídrico xilemático (PHX) y el potencial hídrico foliar (PHF), ambos en MPa. (Potencial medido a medio día en variedad Crimson S., valle de Aconcagua.

(Fuente: INIA, Selles *et al.*, datos no publicados, proyecto FONDECYT 1020836).

Las mediciones de potencial xilemático se deben realizar en hojas expuestas al sol, no existiendo grandes diferencias entre las mediciones que se realizan en dichas hojas asoleadas ubicadas a la altura de los alambres del parrón u hojas asoleadas que están por sobre los alambres. En el Cuadro 11.1 se muestra el Potencial xilemático a medio día, en hojas expuestas al sol, ubicadas en el tercio medio de los brotes, a la altura de los alambres del parrón (canopia alambres) y en brotes que se desarrollan sobre los alambres (dosel elevado). Plantas regadas con 100% de la evapotranspiración del cultivo (ETc).

Cuadro 11.1. Po

| Muestra  | Potencial xilemático (MPa) |               |
|----------|----------------------------|---------------|
|          | Dosel alambres             | Dosel elevada |
| 1        | -0,78                      | -0,80         |
| 2        | -0,70                      | -0,80         |
| 3        | -0,73                      | -0,75         |
| 4        | -0,85                      | -0,85         |
| 5        | -0,82                      | -0,87         |
| 6        | -0,85                      | -0,85         |
| 7        | -0,78                      | -0,8          |
| 8        | -0,76                      | -0,75         |
| 9        | -0,85                      | -0,75         |
| 10       | -0,72                      | -0,75         |
| 11       | -0,71                      | -0,75         |
| 12       | -0,7                       | -0,82         |
| Promedio | -0,77                      | -0,79         |
| Des. Est | 0,06                       | 0,05          |
| CV%      | -7,77                      | -5,69         |

(Fuente: INIA, Selles *et al*, datos no publicados, proyecto FONDECYT 1020836).

La Figura 11.9 muestra el comportamiento del potencial xilemático medido a medio día, en plantas de vid de mesa variedad Crimson S., regadas a 100 % de la Etc. En la Figura 11.10 se muestra que existe una clara relación entre el potencial hídrico promedio, medido entre cuaja y pinta, y la tasa de crecimiento de las bayas en ese mismo período, medido a medio día, en el período de cuaja a pinta ( $\Psi_{xprom}$ , MPa) y la tasa de crecimiento de las bayas (TCC, mm/día). Vides variedad Crimson S., Valle de Aconcagua.

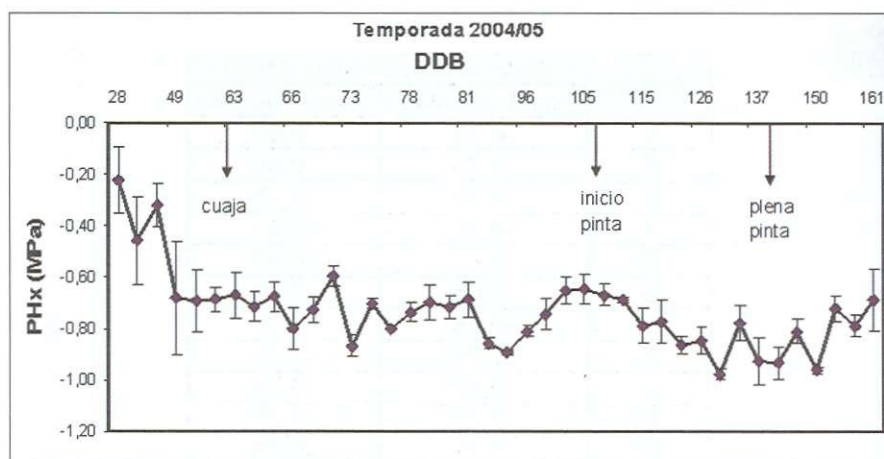


Figura 11.9. Evolución estacional del potencial hídrico xilemático de vides variedad Crimson S., regadas a 100% de Etc. Valle de Aconcagua.

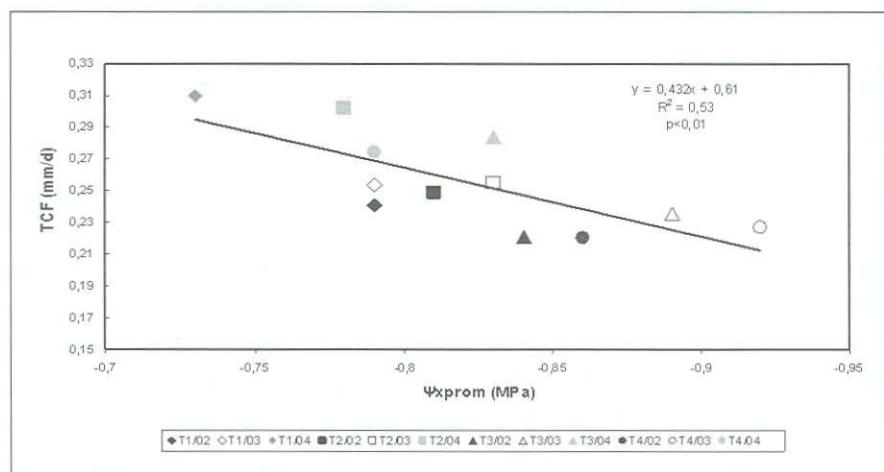


Figura 11.10. Relación entre el potencial hídrico promedio, medido a medio día en el período de cuaja a pinta y la tasa de crecimiento de frutos.

Valores de potencial hídrico xilemático medidos en la zona central de Chile que reflejan un adecuado estado hídrico de las plantas para diferentes especies, se presentan en el Cuadro 11.2.

Cuadro 11.2. Potenciales hídricos xilemáticos (MPa) medidos a medio día, en diferer

| Cultivo                                      | Plantas (MPa) |       |
|----------------------------------------------|---------------|-------|
| Vides de mesa Thompson Seedless (San Felipe) | -0,6          | -0,8  |
| Vides de mesa Flame Seedless (Narcagua)      | -0,65         | -0,9  |
| Vides de mesa Crimson Seedless (Curimón)     | -0,7          | -0,80 |

La cámara de presión es un buen complemento de las mediciones de contenido de humedad de suelo. En condiciones de campo se ha encontrado una estrecha correlación entre el contenido de agua del suelo y los potenciales xilemáticos medidos a medio día, especialmente con los valores de agua en el suelo medidos a 70 cm de la hilera en el centro de la entrehilera (Figura 11.11). Por lo tanto, el potencial hídrico xilemático refleja bien las condiciones más restrictivas de suministro de agua para las plantas por parte del suelo. Entonces, mediante el uso de la sonda FDR se puede determinar profundidad y distribución de agua en el suelo, y mediante el uso de la cámara de presión se puede saber si esas condiciones están dando un adecuado estado hídrico a las plantas. La cámara de presión tiene la ventaja que permite realizar muchas mediciones en un tiempo relativamente corto.

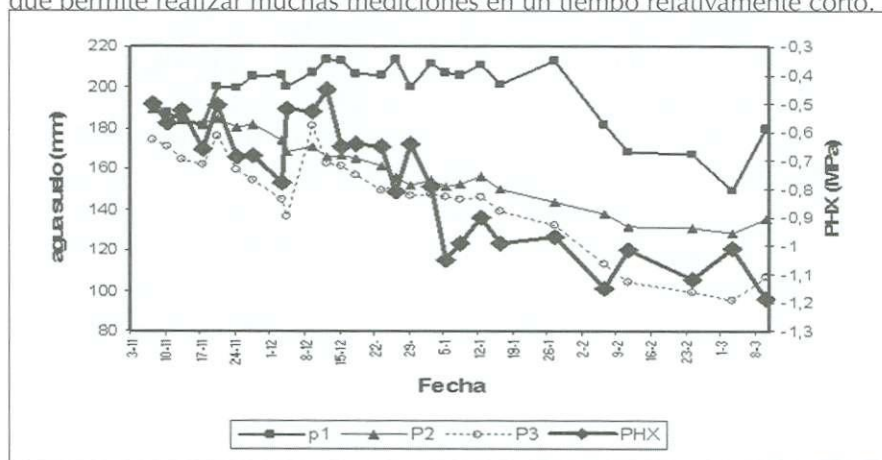


Figura 11.11. Contenido de agua en el suelo sobre la hilera de plantas (P1), a 70 cm de la hilera de plantas (P2), en el centro de la entre hilera (P3) y variación del potencial xilemático (PHx) medido a medio día.

Más detalles sobre las características y el uso de la cámara de presión se pueden encontrar en Selles van Sch., G. ; Ferreyra E., R. Maldonado B., P. (2002).

### **11.3.2. Microvariación del diámetro de troncos**

Otra forma de evaluar el estado hídrico de la planta, que ha comenzado a despertar interés en países más desarrollados, es la medición de las microvariaciones diarias del diámetro que presentan los órganos de la planta, particularmente el diámetro de los troncos. Este método se presenta promisorio en el caso de árboles frutales, donde este indicador ha mostrado ser muy sensible del estado hídrico de la planta.

En el transcurso del tiempo, el diámetro del tronco o de cualquier otro órgano, presenta variaciones irreversibles de diámetro, debido al crecimiento celular, y variaciones reversibles causadas por variaciones del contenido de agua de los diferentes órganos. Así, en un ciclo de 24 horas, durante el período diurno, donde la transpiración es elevada, se produce una fase de reducción de diámetro o contracción de entre una decena a una centena de micrones, seguido de un proceso de rehidratación y crecimiento, durante el período nocturno (Figura 11.12). A medida que disminuye la disponibilidad de agua del suelo, como consecuencia de la extracción que realiza la planta, el crecimiento o expansión nocturna decrece, pudiendo llegar a ser nulo e incluso negativo. La tendencia del crecimiento diario permite determinar si las condiciones de riego son óptimas o no, en cada período fenológico. En el caso particular de uva de mesa, la tendencia del crecimiento pareciera ser el criterio más adecuado. Es importante tener en cuenta el estado fenológico por el que atraviesan las bayas en el momento de la interpretación de la variación de diámetro de tronco, ya que existe una alta interacción entre esos dos procesos.

En la siguiente figura, la línea punteada corresponde a la demanda evaporativa de la atmósfera.



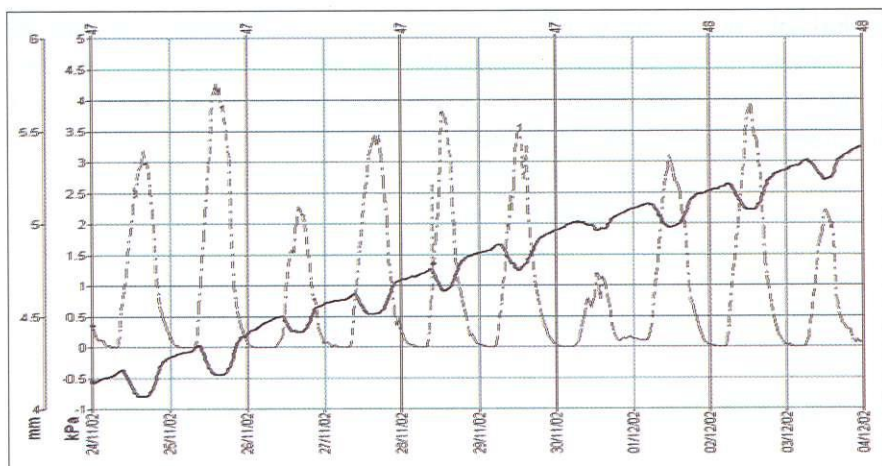


Figura 11.12. Secuencia de la variación diaria del diámetro del tronco en vid de mesa var. Crimson Sedles. (Fuente: INIA, Selles *et al.*, datos no publicados, proyecto FONDECYT 1020836).

Un ejemplo de la respuesta del crecimiento del diámetro de tronco de vides var. Crimson Seedless, regadas con diferentes cantidades de agua a lo largo de la temporada se presenta en la Figura 11.13.

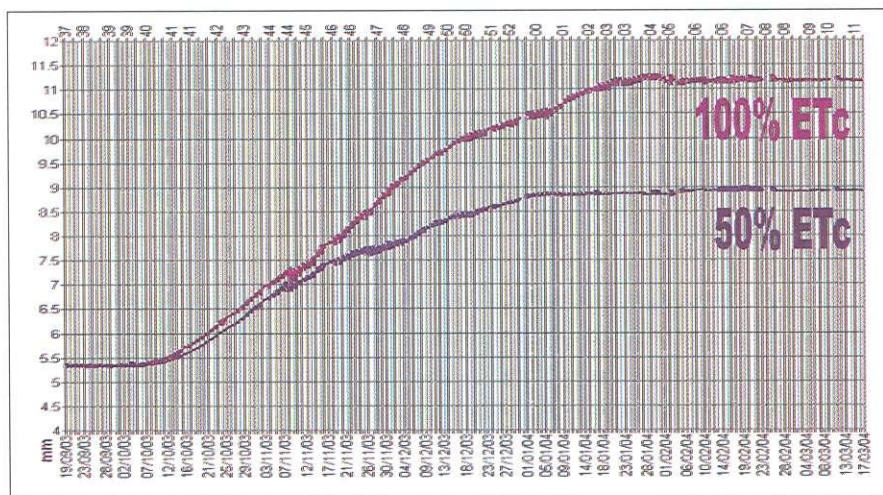


Figura 11.13. Crecimiento del tronco de plantas regadas con diferentes cantidades de agua (100% y 50%  $ET_c$ ), medidos con dendrómetros (vidas var. Crimson S.) (Fuente: INIA, Selles *et al.*, datos no publicados, proyecto FONDECYT 1020836).



Se ha visto que existe una buena correlación entre la tasa promedio de crecimiento de los troncos y la velocidad de crecimiento de las bayas, en el período comprendido entre cuaja y pinta (Figura 11.14), donde la baya adquiere más del 80% de su calibre final.

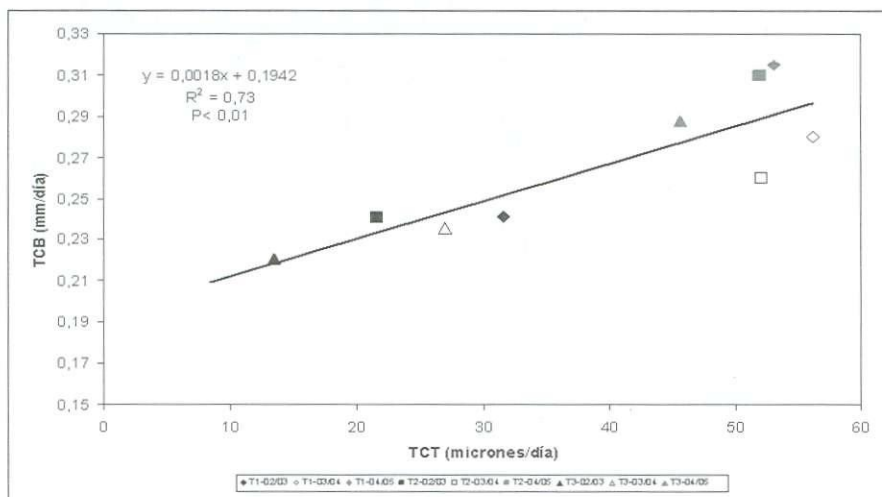


Figura 11.14. Relación entre la tasa de crecimiento del tronco (TCT) y la tasa de crecimiento de las bayas (TCB), en el período comprendido entre cuaja y pinta.

Es necesario tener presente que la tasa de crecimiento de los troncos está estrechamente ligado con el desarrollo de otros órganos (como los frutos), por lo cual la correcta interpretación de este indicador debe tomar en cuenta este hecho. Por otra parte interviene la edad de la planta, siendo la tasa de crecimiento mayor en plantas jóvenes que en plantas adultas. Una forma práctica de abordar este aspecto es mantener en el huerto un sector “testigo” el cual esté adecuadamente regado, e ir comparando el comportamiento del resto del huerto para realizar los ajustes de riego que se requieran. Por otra parte, la carga frutal también afecta la tasa de crecimiento de los troncos, por lo cual no es posible establecer valores umbrales fijos.

La tasa de crecimiento diaria del tronco, ha mostrado ser muy sensible a la reducción de aplicaciones de agua, en particular entre floración y pinta, período en el cual alcanzan alrededor del 80% de su diámetro final. Por otra parte, se ha visto en experimentos de campo, que la tasa de crecimiento de

tronco, medida con dendrómetros electrónicos, es más sensible y precoz en la determinación de déficit hídrico moderado que la cámara de presión.

Este sistema, denominado bioprogramador, o fitomonitor, está compuesto por un captor de desplazamiento lineal o dendrómetro electrónico, que se ubica en la base del tronco de la planta, y mide variaciones del orden de 1 micrón (0,001mm), el cual va conectado a una central de adquisición de datos lo que permite realizar mediciones en forma permanente. Estos fitomonitores pueden estar equipados de otros sensores, para medir diámetro de frutos, temperatura de hojas o humedad de suelo (Figura 11.15).

Hay modelos que se comunican a la central de adquisición de datos mediante cables. Los más recientes lo hacen en forma inalámbrica (ondas de radio), lo que permite hacer mediciones hasta 300 m de distancia de la central en tiempo real. La información se baja a un computador para ser procesada y analizada.

También existen dendrómetros mecánicos en los cuales se deben realizar lecturas dos veces al día, temprano en la mañana para determinar el diámetro máximo del día, y a medio día para determinar el diámetro mínimo.

Este sistema podría permitir una automatización del riego en el caso de los sistemas presurizados (goteo y microaspersión); sin embargo, su aplicación masiva requiere más investigación.

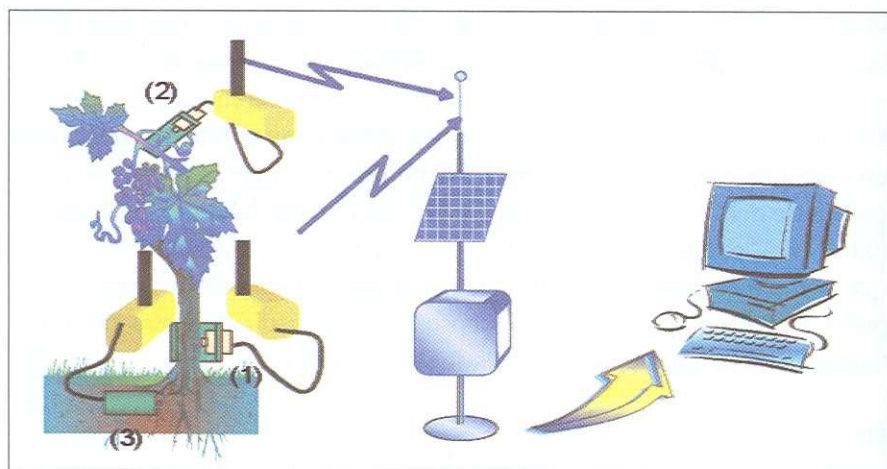
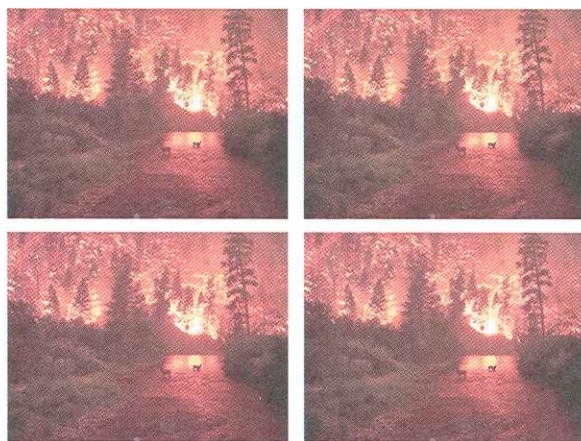


Figura 11.15. Esquema de un fitomonitor, con diferentes sensores. (1) Dendrómetro de tronco (2) dendrómetro de rama (3) sonda de humedad de suelo.



# Aplicación Forestal

## CAPÍTULO 12

### **SISTEMA DE EVALUACIÓN DE PELIGRO DE INCENDIOS FORESTALES, UNA EXPERIENCIA ARGENTINA.**

*Autor*

**María del Carmen Dentoni**

Plan Nacional de Manejo  
del Fuego.

Secretaría de Ambiente y  
Desarrollo Sustentable, Argentina.

Los sistemas de evaluación de peligro son herramientas valiosas para la planificación de actividades de prevención, presupresión y supresión de incendios. El proceso de su desarrollo e implementación operativa tiene que contemplar la generación de indicadores que representen las condiciones de peligro en cada región y asegurar que el personal de operaciones, que deba tomar las decisiones de manejo, tenga la idoneidad y los conocimientos necesarios para poder aplicarlas. En Argentina, el Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF) lleva a cabo distintas acciones tendientes a lograr para el país, el desarrollo de un sistema único que permita evaluar este peligro en forma integral. El proyecto de generación de Índices de Peligro, se inició con la asistencia técnica del Servicio de Protección de la Columbia Británica, y consistió en el ajuste e implementación del Índice Meteorológico de Canadá en áreas piloto de nuestro país. Dicho Índice se encuentra actualmente implementado con éxito en la Región Andino Patagónica y en áreas del noreste Argentino. Sin embargo, frecuentemente las condiciones más críticas son generadas por patrones atmosféricos de gran escala no explicados por los índices calculados con variables meteorológicas de superficie. Por este motivo, el PNMF desarrolla en forma conjunta con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), un programa de apoyo al combate de incendios mediante la provisión de pronósticos meteorológicos especiales, acompañados de avisos o alertas por condiciones de peligro.

## **12.1. EL MANEJO DEL FUEGO EN ARGENTINA**

El Plan Nacional de Manejo del Fuego de Argentina (PNMF), dependiente de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SA y DS), está integrado por el Servicio Nacional de Manejo del Fuego, las Provincias y la Administración de Parques Nacionales. El Servicio Nacional tiene como función garantizar la ejecución de las políticas nacionales en el manejo del fuego, coordinando acciones con las jurisdicciones y promoviendo la estandarización en las prácticas y utilización de nuevas técnicas. La interacción entre el Servicio Nacional y las jurisdicciones se articula mediante una regionalización del país (Figura 12.1). Las provincias y los parques coordinan actividades con el Servicio Nacional mediante una autoridad regional. Sin embargo, el Servicio Nacional no es en ningún

caso responsable de las acciones del manejo del fuego. Siendo la República Argentina un estado federal, éstas recaen en las autoridades competentes de cada jurisdicción. Dentro de este modelo de gestión se conforman equipos de trabajo de carácter interdisciplinario e interinstitucional, para dar respuesta al amplio espectro que involucra esta problemática.



Figura 121. Regionalización de la República Argentina para los efectos de coordinar acciones de manejo del fuego.

El Servicio Nacional se compone de una Coordinación Nacional de la que dependen las coordinaciones de administración, de operaciones, de formación de recursos humanos y prevención, de desarrollo regional, y de desarrollo técnico. Las acciones son de carácter transversal entre estas áreas, por tener cada una un fundamento técnico, un esquema de aplicación operativa nacional, un nivel de organización en las jurisdicciones (a través de la estructura regional ya mencionada), y por requerir de la capacitación del personal para la comprensión y ejecución de las distintas prácticas propuestas. Precisamente, el desarrollo e implementación del Sistema Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios es un ejemplo de esta actividad interactiva. Iniciado desde la coordinación técnica del PNMF



en el año 2000, su implementación se consolida en cooperación con las jurisdicciones, el personal de operaciones y el desarrollo de un esquema de capacitación acorde.

## **12.2. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN OPERATIVA DEL SISTEMA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE PELIGRO**

El concepto peligro de incendios es muy amplio e incluye aspectos como la probabilidad de que la ignición ocurra, las características del comportamiento del fuego en caso que un foco prospere, las dificultades que presentaría para el control, y los daños que causaría (Dentoni y Muñoz, 1999). Para evaluarlo es necesario contemplar distintos aspectos, tanto ambientales como sociales. Para los organismos de manejo del fuego es de gran utilidad conocer el grado de peligro del día y de los días subsiguientes en su área de protección. Asimismo, una vez iniciado un incendio, es necesario conocer la evolución de los patrones meteorológicos que afectan la región y poder predecir el comportamiento del fuego, estimando el peligro potencial que éste presenta.

El desarrollo e implementación de un Sistema Nacional de Evaluación de Peligro que sirva de pauta para la planificación y toma de decisiones, es un proceso complejo y de largo plazo. El éxito de este tipo de sistemas, se basa tanto en la capacidad de los mismos de caracterizar el comportamiento del fuego en los diversos ecosistemas, como de adaptarse a las características culturales, a las circunstancias económicas y la capacidad tecnológica de los organismos de manejo del fuego (Taylor 2001), de manera que el personal de operaciones pueda comprenderlo y utilizarlo para fundamentar decisiones de prevención, presupresión y supresión.

En Argentina, el PNMF lleva a cabo un programa para el desarrollo e implementación operativa de un Sistema Nacional de Peligro de Incendios. Él mismo contempla dos aspectos complementarios entre sí: el apoyo meteorológico al combate de incendios, mediante la provisión de pronósticos acompañados de avisos y alertas por condiciones críticas para el comportamiento del fuego, y la generación de índices de peligro. Los

índices indican el grado de peligro en una región en función de variables meteorológicas de superficie, mientras que los pronósticos permiten identificar patrones atmosféricos críticos que se desarrollan a distintos niveles de la atmósfera y que pueden alterar el comportamiento de un incendio en desarrollo.

En el marco del desarrollo de este sistema, se contempla una etapa futura para la implementación de un modelo de predicción de comportamiento de fuego que permita cuantificar las variables esperadas de su comportamiento, tales como la longitud de llama o la velocidad de propagación del fuego.

### **12.2.1. Apoyo Meteorológico al Combate de Incendios**

Las actividades de apoyo meteorológico al manejo del fuego se iniciaron en el año 1998, en vistas a la necesidad de contar con pronósticos meteorológicos en forma regular durante las operaciones en incendios, con contenidos de utilidad expresados en texto de fácil interpretación para el personal de combate. La elaboración de estos pronósticos requiere del conocimiento, por parte de los pronosticadores, de la forma en que el fuego interactúa con la atmósfera. Esta interacción es compleja. Si bien algunas de sus características son conocidas y comunes a todos los eventos de incendios, en cada región presenta características propias que sólo pueden identificarse adecuadamente mediante la observación de los fenómenos atmosféricos asociados a la ocurrencia de incendios en las áreas de interés.

Para llevar a cabo este tipo de apoyo, es necesario contar con un servicio de pronósticos con capacidad operativa suficiente para atender la problemática en cuestión. Debido a las características de organización del PNMF, el Servicio utilizado debía brindar apoyo a todas las jurisdicciones que lo integran. Por otra parte, dadas las condiciones de alto riesgo a las que son expuestas las personas y bienes durante los incendios forestales y de pastizales, se consideró que los pronósticos tenían que ser emitidos por un ente con competencia legalmente reconocida en el tema. En Argentina, el organismo que cumple estos requisitos es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), organismo con quien el PNMF tiene actualmente un proyecto de cooperación.

A través del mencionado acuerdo, el SMN provee los pronósticos especiales para incendios, en un formato acordado con el personal de incendios. El PNMF articula la llegada en tiempo y forma de los mismos al personal de incendios. Con la extensión en el uso de estos pronósticos, surgió la inquietud de complementarlos con informes que enfatizaran aquellos casos en los cuales las condiciones pronosticadas resultarían de mayor peligro para el incendio. No habiendo antecedentes de informes de este tipo, se efectuó un exhaustivo análisis de los criterios utilizados en otros países para la emisión de avisos y/o alertas por condiciones meteorológicas proclives al comportamiento extremo del fuego, y de cuáles de estas condiciones sería factible aplicar a la Argentina (Schinnelli, 2003). Con el propósito de caracterizar las situaciones atmosféricas asociadas a grandes incendios en Argentina y de validar los criterios utilizados, se efectuaron estudios de los patrones meteorológicos asociados a grandes incendios (Muñoz, *et al.* 1999, Dentoni, *et al.* 1999).

### **12.2.2. Generación de Índices de Peligro de Incendios**

**a) Determinación de los indicadores a utilizar.** Desde hace algunos años, en algunas regiones del país se utilizaban distintos índices meteorológicos de peligro de incendios. Por ejemplo, en la región Andino Patagónica norte se utilizaba el desarrollado por Rodríguez y Moretti (1988), y en el litoral el desarrollado por Soares (1972). Si bien estos índices daban información general del grado de peligro, por ejemplo para información al público, sus aplicaciones operativas eran limitadas. Por este motivo, a medida que las organizaciones de manejo del fuego fueron avanzando en su grado de desarrollo, se comenzó a poner en evidencia la necesidad de contar con indicadores que brindaran información sobre aspectos específicos del comportamiento del fuego. Desde el PNMF se comenzó a percibir la necesidad de estandarizar, en todo el país, los indicadores utilizados para evaluar el peligro, de manera que pudiera hacerse el análisis comparativo de la situación en las distintas regiones, haciendo más eficiente la asignación de recursos.

Dado que la decisión de optar por el desarrollo de un nuevo sistema o la adopción de alguno de los que se encuentran en uso debe estar fundamentada en el conocimiento de los sistemas existentes, en el año 1999 se efectuó una revisión de los sistemas utilizados en los distintos países (Dentoni y Muñoz 1999). Como resultado, se encontró que entre los países que contaban con sistemas compuestos de uno o varios índices - en los que cada uno indica la contribución de un determinado factor a la probable ocurrencia, el comportamiento y los efectos de un incendio- estaban los Estados Unidos y Canadá. Este tipo de sistemas daría respuesta a la necesidad de ampliar las aplicaciones operativas de los indicadores utilizados.

El Sistema Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios de Estados Unidos comenzó a desarrollarse en 1958, en respuesta a las recomendaciones surgidas de una conferencia del Servicio Forestal realizada en 1940 (Deeming y Lancaster, 1981). Desde entonces, se desarrollaron y probaron las distintas fases que lo componen. El sistema provee índices que tienen interpretación física en lo que respecta a ocurrencia y comportamiento del fuego. El cálculo de los mismos requiere de observaciones meteorológicas diarias. Entre estas variables se encuentra la duración de la precipitación (Deeming *et al.* 1974), variable que no es registrada normalmente en las estaciones de nuestro Servicio Meteorológico Nacional. Entre las variables de ingreso, se encuentra también el contenido de humedad de los combustibles muertos, variable que tampoco es medida en nuestras estaciones. Asimismo, las características de la vegetación se ingresan al sistema a través de los denominados modelos de combustible. La utilización de este sistema, como base para el desarrollo de un sistema de evaluación de peligro para Argentina, hubiese requerido de cambios en la forma de registros meteorológicos y del desarrollo de modelos de combustible, en forma previa al inicio del proceso.

La investigación sobre sistemas de evaluación de peligro de incendios forestales en Canadá fue iniciada por J. G. Wright en 1928 (Van Wagner 1987). El Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales, utilizado actualmente en ese país, comenzó a desarrollarse en 1968, continuando con la filosofía de construir sobre las experiencias anteriores. Este sistema consiste de cuatro módulos o subsistemas: *Subsistema Meteorológico de*

*Peligro de Incendios*, también denominado *Índice Meteorológico de peligro de Incendios*; *Subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego*; *Subsistema de Predicción de Ocurrencia de Fuego* y *Subsistema Accesorio de Humedad de Combustibles*. Este sistema es utilizado actualmente en todo Canadá y ha sido adaptado a otros países, como por ejemplo Nueva Zelanda (Fogarty et al., 1998).

El Índice Meteorológico de Peligro de Incendios se basa en el seguimiento del contenido de humedad de tres capas de suelo orgánico de distinta profundidad, que se consideran representativas del contenido de humedad de tres clases de combustibles forestales, más el efecto del viento en el comportamiento. Las variables de ingreso son la temperatura, humedad relativa y velocidad de viento observadas a las 12 h, y la precipitación acumulada durante las últimas 24 h, medida a las 12 h. El mismo está conformado por seis componentes: tres códigos que representan el contenido de humedad de tres clases de combustibles con distinta tasa de secado; dos índices intermedios que representan a la velocidad de propagación y la carga de combustible disponible, respectivamente; y un índice final que representa a la intensidad de línea (Van Wagner, 1987) (Figura 12.2). Cada una de las componentes mencionadas tiene distintas aplicaciones en las operaciones. Por ejemplo, el código de humedad del combustible fino indica la probabilidad de que fuentes antrópicas generen focos, mientras que el código de humedad del combustible medio indica la posibilidad de que se produzca la ignición ante la ocurrencia de un rayo, por lo que los dos son utilizados para activar mecanismos de detección. El código que indica el contenido de humedad de los combustibles pesados, llamado “código de sequía”, es utilizado para planificar la liquidación, ya que por reflejar los efectos del secado estacional de los combustibles se lo asocia a la ocurrencia de fuegos de rescoldo en capas profundas. Los índices de comportamiento también son utilizados para distintos aspectos de la planificación. Es fundamental que el personal que los utiliza pueda interpretar adecuadamente a cada uno de estos indicadores.

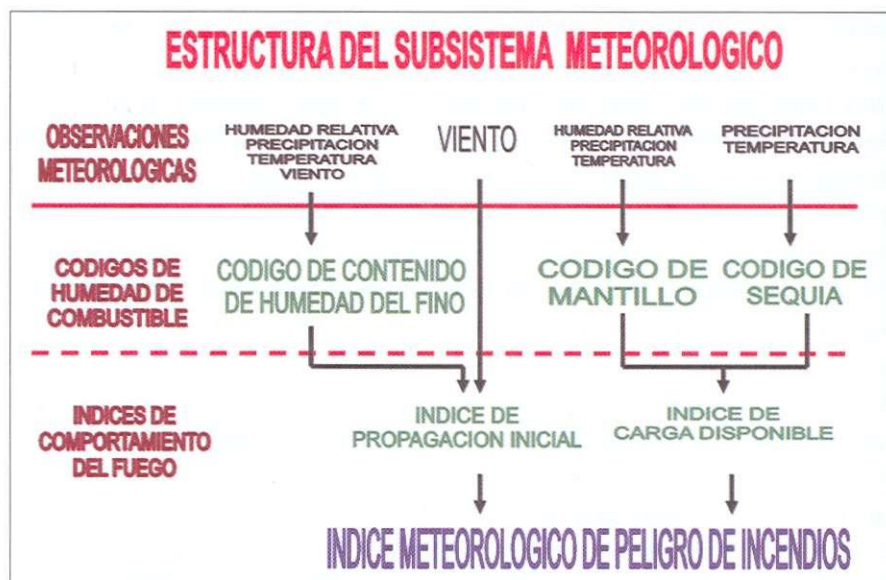


Figura 1.2.2. Estructura del Índice Meteorológico que compone el Sistema de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales desarrollado en Canadá (Van Wagner 1987).

El subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego provee estimaciones cuantitativas de parámetros del comportamiento, como la velocidad de propagación de la cabeza del incendio, el consumo de combustibles, la razón de crecimiento del perímetro y la intensidad del fuego, para un momento y lugar determinados. Este subsistema requiere que la vegetación esté clasificada en “tipos de combustible”, en forma similar a los modelos de combustible utilizados por el sistema de Estados Unidos.

Sin embargo, la estructura modular del sistema canadiense permite trabajar, inicialmente, con el índice meteorológico, contando con una herramienta que brinda información sobre el contenido de humedad de los combustibles y de distintos aspectos del comportamiento del fuego, y que requiere como variables de ingreso sólo variables meteorológicas medidas en las estaciones estándar. Esto, y la consideración que los procesos de humidificación y secado de los combustibles siguen el mismo proceso físico en todo el mundo, y que los fuegos responden a los mismos factores físicos de combustible,

topografía y clima (Taylor 2001), fundamentaron la decisión de analizar la posibilidad de adaptar dicho índice a la Argentina. Dado que los desarrollos de las funciones de secado y humidificación fueron desarrollados para un combustible estándar de Canadá, se reconoció, desde el comienzo, la necesidad de desarrollar modelos de cambios en el contenido de humedad propios de los tipos de combustibles preponderantes en Argentina y de las características de sus suelos.

**b) Desarrollo e implementación operativa.** Las acciones se iniciaron a través del denominado Proyecto 2000, de Manejo del Fuego y Transferencia de Tecnología, desarrollado en forma conjunta entre el Servicio de Protección de la Provincia de British Columbia y el Plan Nacional de Manejo del Fuego, y que contó con financiamiento de la Agencia de Desarrollo Internacional Canadiense (ADIC). El mismo contemplaba el desarrollo e implementación operativa de un sistema de evaluación de peligro, basado en el sistema canadiense, en áreas piloto de la Patagonia, la Región Andina de la Provincia del Chubut y el Parque Nacional Lanín en la Provincia de Neuquén.

En un informe sobre la factibilidad de desarrollar un Sistema de Evaluación de Peligro de Incendios, basado en lo hecho en Canadá, Taylor (2001) expresó: “Existe un buen potencial para adaptar el Sistema de Evaluación de Peligro Canadiense a la Argentina, porque el sistema canadiense es modular, tiene una buena capacidad para predecir el comportamiento del fuego e incluye material interpretativo bien desarrollado, pero particularmente porque las agencias argentinas de manejo de fuego reconocen los beneficios de un sistema nacional de evaluación de peligro. A pesar de que existen grandes variaciones en los tipos de combustible en Argentina, se pueden encontrar analogías razonablemente similares en el sistema canadiense para muchos tipos de combustible importantes tales como pastizales, plantaciones y bosques abiertos de cipreses nativos. Sin embargo, hay que desarrollar o adaptar los modelos de combustible de matorrales. Asimismo, las agencias de manejo de fuego en Argentina tienen estructuras similares a las que tenemos en América del Norte”.

A efectos de analizar la relación entre este índice y el comportamiento del fuego, se efectuó el cálculo de valores históricos del mismo y se los



relacionó con datos de la ocurrencia de fuego de la región de estudio. Cabe mencionar que en la Región Andino Patagónica son escasas las estaciones meteorológicas que cumplen con los estándares requeridos (Turner y Lawson, 1978). Asimismo, los registros históricos de fuego no están siempre completos. Si bien actualmente se está trabajando para mejorarlos, la disponibilidad de información histórica en el año 2000 era limitada. Los registros de incendios contenían fecha de ignición y tamaño final del fuego, sin discriminar la superficie diaria afectada durante un mismo incendio.

El Índice Meteorológico, calculado para el día de inicio del incendio, se clasificó de acuerdo con la escala de clases de peligro utilizada para la región sudeste de la Columbia Británica, que posee un clima semejante al de la región de estudio (Taylor 2001). El número de focos de incendio y el área quemada, se distribuyeron de acuerdo a dichas clases de peligro. Tanto la superficie afectada como el número de focos aumentó en los rangos de peligro bajo a muy alto. Entre las clases muy altas y extremas, se hace necesario ajustar los límites. El efecto del viento es el principal factor determinante de la superficie afectada en Patagonia, siendo importantes las diferencias horarias y diarias en esta variable. El no contar con registros sobre la evolución diaria de la superficie afectada durante cada incendio, es uno de los factores que puede introducir errores en la correlación entre la superficie afectada y el grado de peligro, particularmente en los incendios que afectan grandes superficies y que consecuentemente tienen mayor duración.

Dado que la ocurrencia de focos causados por el hombre está condicionada por el contenido de humedad del combustible fino, se analizó la relación entre los focos detectados y el código de humedad de este combustible fino. No fue factible realizar un análisis similar con los otros indicadores de humedad de combustible y de comportamiento de fuego que conforman el Índice Meteorológico de peligro, por falta de detalle en los registros históricos. Para una apreciación de la respuesta del índice de carga disponible a la ocurrencia de incendios que involucren combustibles medios y pesados, se efectuaron estudios de casos puntuales de grandes incendios. Se observó durante dichos eventos que el índice alcanzaba valores próximos a los máximos históricos para la región correspondiente. Como parte de este proyecto, se capacitó a

técnicos locales para tomar datos durante los incendios y contar, así, con más elementos de análisis.

Para la implementación operativa del Índice, se efectuó una zonificación de las áreas de trabajo, teniendo en cuenta las características climáticas, la vegetación, la topografía y la experiencia del personal operativo en cuanto al comportamiento del fuego en cada zona. Se seleccionaron estaciones meteorológicas representativas de cada una de ellas; cabe mencionar que algunas zonas no están representadas por ninguna de las estaciones existentes, por lo que se está gestionando la extensión de la red. El Índice es calculado diariamente, y se lo pronostica a 48 y a 72 horas con la cooperación del SMN que provee las variables meteorológicas pronosticadas.

Contando con el cálculo de todos los indicadores que conforman el índice final, es necesario fijar criterios para asignar el grado de peligro. Estos criterios pueden basarse en la asignación de distintos grados de peligro a ciertos rangos de la escala del Índice Meteorológico (Van Wagner 1987, Owen 1979, Lawson 1972). Dichos rangos varían para los distintos ecosistemas, por lo que es necesario efectuar un análisis histórico en cada caso. Con esta metodología, la definición del grado de peligro se efectúa con un único criterio para todas las asociaciones vegetales presentes en la región en cuestión. Sin embargo, la influencia de cada una de las variables meteorológicas involucradas en el cálculo del Índice es diferente de acuerdo a la vegetación de que se trate. Por este motivo, el peso relativo de los códigos de humedad del combustible, y de los indicadores de velocidad de propagación inicial y de carga disponible, varía de acuerdo a la estructura de la vegetación. Por ejemplo, en el caso de la región Andino Patagónica, donde el viento es considerado un factor crítico sobre el grado de peligro, es importante considerar su efecto diferente sobre el comportamiento del fuego en los distintos tipos de vegetación, asignando distinto peso al índice de propagación inicial.

Por lo explicado, se acordó definir las principales asociaciones vegetales en la región y utilizar, para cada una, distintos modelos para evaluar el grado de peligro, dando distinto peso relativo a los indicadores que componen el Índice. Se definieron cinco grandes asociaciones vegetales: pastizales,

arbustales, bosque abierto, bosque húmedo y cerrado, y plantaciones. Para el caso de pastizales, se utilizó un modelo desarrollado en Nueva Zelanda, que toma en cuenta el índice de propagación inicial y el contenido de humedad del pasto para determinar las clases de peligro; para el caso de arbustales, se utilizó un modelo desarrollado en el mismo país que en este caso considera al índice de propagación inicial y la altura del arbustal (Pearce 2000).

Finalmente, para los dos tipos de bosque y las plantaciones, se utilizaron distintas combinaciones de los índices de propagación inicial de disponibilidad de combustible medio y pesado, basadas en modelos desarrollados en Canadá para asociaciones de vegetación de características similares (Taylor et al. 1996). El Cuadro 12.1, muestra como, ejemplo, el modelo utilizado para definir el grado de peligro en un bosque abierto.

| INDICE DE<br>PROPAGACION<br>INICIAL | INDICE DE CARGA DISPONIBLE |       |       |       |       |        |         |
|-------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
|                                     | 0-20                       | 21-30 | 31-40 | 41-60 | 61-80 | 81-120 | 121-160 |
| <b>1</b>                            | B                          | M     | M     | M     | M     | A      | A       |
| <b>2</b>                            | M                          | M     | M     | A     | A     | A      | MA      |
| <b>3</b>                            | M                          | M     | A     | A     | A     | MA     | MA      |
| <b>4</b>                            | M                          | M     | A     | A     | MA    | E      | E       |
| <b>5</b>                            | M                          | A     | A     | MA    | E     | E      | E       |

**Cuadro 12.1.** Modelo utilizado para la evaluación del peligro en bosques abiertos, en función del índice de propagación inicial y del índice de carga disponible. Adaptado de *Field Guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System* (Taylor, et al, 1996).

En cada área de protección, el personal responsable de las operaciones de manejo del fuego, determina el grado de peligro final en su área, en función de la vegetación preponderante. Una vez determinado el grado de peligro,

se toman las medidas operativas de prevención y presupresión, de acuerdo a guías desarrolladas a través del proyecto.

Durante las temporadas de incendios, se efectúa el seguimiento estacional del Índice Meteorológico. Esta evolución estacional es comparada con la evolución estacional histórica, permitiendo estimar la situación relativa de la temporada en cuestión respecto de los valores medios y extremos históricos. Por ejemplo, el incendio conocido como “Las Planicies”, se inició el 24 de febrero de 2002 y afectó 4 mil hectáreas del Parque Nacional Lanín, uno de los incendios de mayor superficie afectada en la historia del Parque. El inicio y el comportamiento extremo de este incendio se produjeron asociados a los valores del índice más alto de esa temporada y próximos a los extremos históricos.

A partir del año 2002, se inició la extensión de este sistema a otras jurisdicciones de la Región Andino Patagónica. Actualmente, el índice es calculado con datos de estaciones meteorológicas de las Provincias de Neuquén, Río Negro y Santa Cruz. Cabe mencionar que en la Provincia de Misiones se efectuaron pruebas iniciales para observar la respuesta del Índice al comportamiento del fuego. Las mismas fueron llevadas a cabo por la Empresa Alto Paraná Sociedad Anónima. El personal de la empresa fue capacitado por el PNMF, y posteriormente realizó un análisis de datos históricos propios de valores alcanzados por el Índice en relación a la ocurrencia de incendios. Los resultados fueron satisfactorios y la empresa utiliza actualmente este indicador para fundamentar sus decisiones operativas (Patzner, *com. pers.*). Esta experiencia, genera una muy buena expectativa de extender el uso del mismo índice a ecosistemas con características muy distintas al Patagónico, como es el de la Provincia de Misiones.

### 12.3. DISCUSIÓN

En dos áreas piloto de la Patagonia Argentina, el Parque Nacional Lanín y la Región Andina de la Provincia del Chubut, se logró la implementación del Índice Meteorológico desarrollado en Canadá. El personal de operaciones encontró en él mismo una herramienta de gran utilidad para la planificación de medidas de prevención y la asignación de recursos de presupresión.

La evaluación del grado de peligro se efectuó a través de modelos adecuados a las características de la vegetación. De acuerdo a lo observado en las últimas temporadas, los modelos utilizados para evaluar el peligro en arbustales y bosques abiertos sobreestiman el grado de peligro, por lo que se requieren estudios para ajustar los límites de las clases de peligro.

Por la experiencia realizada en las mencionadas áreas piloto, otras jurisdicciones de la región requirieron utilizar el mismo sistema. Se inició, entonces, la extensión del uso del Índice a toda la extensión de la Región Andino Patagónica. Asimismo, se observaron buenos resultados en un ecosistema muy diferente al patagónico, como es el de la Provincia de Misiones. Actualmente, se continúa trabajando con las Provincias de Misiones, y se están iniciando las acciones en la Provincias de Entre Ríos y Corrientes. El mayor desafío para lograr la implementación nacional, lo presenta el ajuste del índice a los ecosistemas áridos y semiáridos, donde la presencia de arbustales es dominante.

Los pronósticos meteorológicos de apoyo al combate son utilizados por organismos de manejo del fuego de todo el país. La inclusión de avisos o alertas por condiciones proclives al comportamiento extremo resultan de gran utilidad al personal. Se reconoce la necesidad de avanzar en la caracterización de patrones atmosféricos asociados a grandes incendios.

Se observa que la utilización de herramientas, como los índices o pronósticos, promueve la observación más detallada de la evolución de las temporadas de incendios, permitiendo adicionar información para efectuar los ajustes necesarios. La implementación de las mismas se logró involucrando al personal de operaciones en las distintas instancias del trabajo. El proceso se acompañó con la generación de material didáctico y el dictado de cursos específicos en estas temáticas.

## 12.4. LITERATURA CITADA

Deeming, J. E., Lancaster, J. W., Fosberg, M. A., Furman, W. R., Schroeder, M. J. 1974. The National fire Danger Rating System. Res. Pap. RM-84. Fort Collins Colorado, USA. Department of Agriculture. Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. 165 pp.

Deeming, J.E. y J.W. Lancaster. 1981. Background, philosophy, implementation- National Fire Danger Rating System. 20 pp.

Dentoni, M. C. y M. M. Muñoz. 1999. Glosario de términos relacionados con el manejo del fuego. Informe Interno Plan Nacional de Manejo del Fuego. 25pp.

Dentoni, M. C., G. E. Defossé, J. C. Labraga y H. F. del Valle. 2001. Atmospheric and fuel conditions related to the Puerto Madryn fire of January 21, 1994. Meteorological Applications 8, 361-370.

Dentoni, M. C. y Muñoz M. M. 1999. Sistemas de evaluación de peligro de incendios. Informe Interno Plan Nacional de Manejo del Fuego. 37pp.

Dentoni, M.C., Defossé, G. E., Muñoz, M. M., Rodríguez, N., Colomb, H. 1999. Estudio de grandes incendios: el caso de la estancia San Ramon en Bariloche, Río Negro, Argentina. Informe Técnico PNMF-CIEFAP- GTZ. 94pp.

Fogarty, L. G., H. G. Pearce, W. R., Catchpole y M. E. Alexander. 1998. Adoption vs. Adaptation: Lessons from applying the Canadian Forest Fire Danger Rating System in New Zealand. III International Conference on Forest Fire Research. 14 th Conference on Fire and Forest Meteorology. Vol I; 1011-1028.

Lawson, B. D. 1972. An interpretative guide to the Canadian Forest Fire Behavior System. Canadian Forest Service . Pacific Forest research Center. Rep. BCP; 3 -72.

Muñoz, M. M., Epele, F. E y M. C. Dentoni. 1999. Incendio de Cerro Centinela de enero de 1999. Análisis de un caso. Informe Interno Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF) - Dirección General de Bosques y Parques de Chubut (DGBYP). 30 pp.

Owen, D. H. 1979. Fire Weather Indexes. Decision aids for forest operations in British Columbia. Province of British Columbia. Ministry of Forests. 68pp.

Pearce, G. 2000. Scrubland fire danger class criteria. Fire Research Programme. University of Canterbury. New Zeland.

Rodríguez, N. y A. Moretti. 1988. Índice de peligro de propagación de incendios forestales. VI Congreso Forestal Argentino. Tomo III. Santiago del Estero. 5pp.

Schinnelli, L. 2003. Elaboración e implementación operativa de notificaciones de avisos y alerta de condiciones meteorológicas críticas para el desarrollo de incendios forestales. Seminario de graduación. Ingeniería Forestal. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB). 50pp.

Soares, R. V. 1972. Determinación de un índice de peligro de Incendios para la Región Centroparanaense. Brasil. Turrialba. CATIE/IICA, Ms. Thesis. 72pp.

Taylor, S. W., Pike, R. G. y M. E. Alexander. 1996. Field Guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Canadian Forest Service. Pacific Forestry Center. 59 pp.

Taylor, S. W. 2001. Consideraciones para la aplicación del Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS) en Argentina. Servicio Forestal Canadiense. Centro Forestal del Pacífico, Recursos Naturales Canadá. 38 pp.

Turner, J. A. y B. D. Lawson. 1978. Weather in the Canadian Forest Fire Danger rating System; a user guide to national standards and practices. Environment Canada. Canadian Forest Service. Pacific Forest Research Center. Victoria, BC. Info. Rep. BC-X-177.

Van Wagner, C. E. 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Ottawa; Ontario. Forestry Technical Report 35. 37pp.



## CAPÍTULO 13

### **EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES**

*Autor*

**Patricio Pedernera A.**

Ingeniero Forestal

patricio.pedernera@umayor.cl

Desde hace bastante tiempo, diversos investigadores en diferentes países se han preocupado de obtener indicadores tendientes a estimar, de alguna manera, los niveles de conflictividad que el problema de la iniciación de incendios representa diariamente dentro de la zona de responsabilidad de un programa de protección.

Producto de este desarrollo, se ha llegado a consenso en que uno de los aspectos importantes que todo indicador de esta naturaleza debe incluir, es la condición de la vegetación (desde el punto de vista de su contenido de humedad), dado que la susceptibilidad a la ignición depende en gran medida de la humedad de los combustibles.

A su vez, la humedad de los combustibles se relaciona directamente con las condiciones meteorológicas prevalecientes en una determinada zona, dado que por sus características fisiológicas los vegetales consumen mayor o menor cantidad de agua (aumentando o disminuyendo su contenido de humedad) en función de las condiciones de temperatura y humedad relativa que se registran en la zona. Una situación similar ocurre en el caso de los combustibles muertos, donde las condiciones ambientales regulan el contenido de humedad de dichos materiales, producto de la higroscopicidad de la madera.

La evaluación permanente de las condiciones meteorológicas, en una zona determinada, permite conocer el estado o condición de la vegetación como indicador de la probabilidad de ignición.

Diversos sistemas se han desarrollado con el objetivo de evaluar los factores condicionantes de la ocurrencia de incendios, el comportamiento del fuego, y los efectos que el fuego puede causar sobre el medio natural. Al respecto, aquellos sistemas que intentan evaluar la probabilidad de ignición se denominan Sistemas de Evaluación del Riesgo de incendios. Por otra parte, aquellos sistemas que toman en consideración, además del riesgo, las características del comportamiento del fuego en caso que un incendio prospere, las dificultades para el control y los daños que el fuego causará, se denominan Sistemas de Evaluación del Grado de Peligro de Incendios Forestales (Dentoni y Muñoz, 2003).

Los sistemas de evaluación del riesgo y/o peligro de incendios se componen de índices, cada uno de los cuales es un indicador del efecto de un determinado factor a la probable ocurrencia, el comportamiento y los efectos de un incendio.

Los sistemas más simples se componen de un único índice que toma en cuenta sólo el efecto de algunas variables meteorológicas para proveer información sobre la probabilidad de ignición, suponiendo la existencia de una fuente de ignición.

Existen también otros tipos de índices que operan sobre el comportamiento de una variable única, y que se utilizan para complementar los sistemas de evaluación del grado de peligro. Así, se encuentran los índices de sequía, que evalúan la disponibilidad de agua o estado de los combustibles, y los índices de estabilidad que permiten conocer las condiciones de estabilidad atmosférica.

Otros sistemas más complejos incorporan relaciones entre las variables del tiempo meteorológico, el estado de los combustibles y el comportamiento del fuego, para producir indicadores que proporcionan una medida cuantitativa de las dificultades para el control (en términos de las características del frente de llamas) y del daño o impacto potencial que el incendio puede causar (Dentoni y Muñoz, 2003).

Los sistemas de evaluación del grado de peligro son herramientas imprescindibles para la planificación de las actividades de prevención, posibilitando la identificación de áreas donde es necesario efectuar reducción de combustibles y del momento más adecuado para realizarlas. También permiten decidir la asignación de recursos antes y durante el desarrollo de las temporadas de incendios, y ofrece una alternativa para evaluar con mayor objetividad la eficiencia de las medidas de prevención y de las técnicas de supresión aplicadas.

### 13.1. EVALUACIÓN DEL GRADO DE PELIGRO

La preocupación por tratar de estimar la probabilidad de ignición en áreas determinadas, para tomar con la suficiente anticipación las medidas tendientes a minimizar los daños que puede causar el fuego, ha sido enfrentada de diversas maneras en diferentes países.

En el hemisferio norte, y de acuerdo a las causas que originan los incendios, en varios países se han desarrollado sistemas basados en un índice único como el Índice de Nesterov (Nesterov, 1949), el Índice de Tellysin y el Índice Meteorológico Francés. En todos estos casos la idea es relacionar el estado meteorológico con la probabilidad de inicio de incendios, considerando, casi exclusivamente, variables meteorológicas como predictoras de la probabilidad de ignición.

También, en algunos países del Hemisferio Sur (Brasil, Argentina) se ha intentado abordar el mismo problema analizando correlaciones entre variables meteorológicas y la ocurrencia y magnitud de los incendios que se han registrado en dichas áreas (Dentoni y Muñoz, 2003).

Sin embargo, los resultados obtenidos en su aplicación no han sido suficientemente satisfactorios, por cuanto en algunas regiones la iniciación de incendios depende, además del estado de la cubierta vegetal, de la acción del ser humano como el agente que aporta la energía necesaria para provocar la ignición.

Quizás, los sistemas de evaluación del grado de peligro más desarrollado corresponden a aquellos construidos e implementados en Estados Unidos y Canadá. En este caso, los sistemas pertenecen a herramientas complejas que relacionan varios indicadores entre sí, para entregar respuestas globales o específicas, para diferentes factores que explican el comportamiento del fuego, la probabilidad de ignición y los daños que los probables incendios puedan causar.

El sistema Nacional de Evaluación del Peligro de Incendios de Estados Unidos (Deeming *et al.*, 1978), comenzó a desarrollarse en 1958. Desde

entonces, y hasta 1978, se elaboraron y probaron los distintos elementos que lo componen.

Este sistema, se basa en los siguientes principios:

- a) Considera solamente el fuego inicial, suponiendo que el comportamiento no es errático y que no hay coronamiento.
- b) Es un indicador de aquella parte del trabajo potencial de contención que puede atribuirse al comportamiento del fuego.
- c) Asume que la longitud de llamas de la cabeza del incendio, está directamente relacionada con las dificultades de contención causadas por el comportamiento del fuego.
- d) Evalúa las condiciones más críticas para una región determinada, empleando observaciones meteorológicas correspondientes a aquellas horas en las que se considera que el peligro de incendios es más alto, en espacios abiertos, en las exposiciones más secas.
- e) Proporciona índices que tienen interpretación física en lo que respecta a la ocurrencia y al comportamiento, los que pueden ser empleados en forma conjunta o independiente para facilitar un análisis flexible de las complejidades de planificación del control.
- f) Relaciona linealmente a los distintos índices que lo componen, con el aspecto del comportamiento del fuego que cada uno de ellos evalúa.
- g) Emplea observaciones meteorológicas diarias para evaluar el peligro diario y valores pronosticados para generar indicadores de peligro de incendios futuros para grandes áreas.

Como variables de entrada, este sistema considera una serie de variables que tienen que ver con la condición meteorológica (temperatura, velocidad y dirección del viento, precipitación acumulada, nivel de actividad eléctrica, humedad relativa); otras que tienen que ver con el riesgo causado por rayos y por la actividad humana; y otras que se relacionan con la localización espacial y temporal para el área a la cual se le está calculando los indicadores de riesgo y peligro.

Como salidas principales, el sistema proporciona los siguientes indicadores:

- a) **Índice de Riesgo por Rayos y por Causas Humanas.** Permite la activación de los sistemas de detección a su máximo alcance (cuando alguno de los indicadores es alto), y también posibilita instruir a las operaciones de detección para que concentren su accionar en los cinturones de riesgo por causa de rayos o por causas humanas.
- b) **Índice de Quema.** Es un indicador de la cantidad de energía que el incendio liberará hacia el medio ambiente. Se emplea para obtener el tiempo necesario para lograr la contención del incendio, sin que éste supere una superficie determinada. Por otra parte, se utiliza para decidir la forma o método de ataque.
- c) **Índice de Carga.** Integra los resultados obtenidos por todos los demás índices, y se emplea como un indicador del nivel en el que deben mantenerse las fuerzas de supresión en un área de protección, para poder manejar las situaciones potenciales de incendios.

Por su parte, el Canadian Forest Fire Danger Rating System (Van Wagner, 1987) comenzó a desarrollarse en 1968, sistema que está formado por cuatro subsistemas que entregan información sobre el mismo número de componentes del comportamiento del fuego:

- 1) **Índice Meteorológico de Peligro de Incendios.** Considera el efecto de los factores meteorológicos, medidos en estaciones meteorológicas a las 12:00 horas, en el comportamiento del fuego.
- 2) **Sistema accesorio de humedad de los combustibles.** Considera tres indicadores que permiten evaluar la condición o estado de humedad de los combustibles. El primero de ellos es el Código de Humedad de los combustibles finos, que permite evaluar el contenido de humedad de la hojarasca y de otros combustibles finos; el segundo es el Código de Humedad del Mantillo, que evalúa el mismo aspecto, pero esta vez referido a la condición de humedad de la materia orgánica profunda y compacta; y finalmente se considera el Código de Sequía, que permite medir el efecto acumulado de la sequía en la condición de la vegetación.

- 3) **Índice de propagación inicial.** Indica la velocidad de propagación que el fuego puede alcanzar.
- 4) **Índice de Combustible Disponible.** Brinda una estimación de la carga de combustible disponible para la propagación del fuego, proporcionando una indicación de la cantidad de energía que un incendio puede liberar hacia la atmósfera.

El sistema del índice meteorológico de peligro de incendios resume, en una sola cifra, los efectos combinados del resto de los componentes. Es un buen indicador de la actividad del fuego y se emplea como medida general del peligro con propósitos administrativos (Van Wagner, 1987).

En Australia también se emplean indicadores para evaluar el riesgo y el peligro de incendios forestales. La investigación se inicia en la década de los '60, con un enfoque destinado a la evaluación del peligro de incendios en pasturas y bosques de Eucaliptus en Nueva Gales del Sur. En la década de los '80 se introdujeron cambios en los sistemas utilizados debido a ciertas deficiencias en la predicción del comportamiento del fuego. Para resolver estas deficiencias se tendió a incorporar modelos de comportamiento del fuego desarrollados en diferentes países, sin haber sido probados previamente en Australia (Dentoni y Muñoz, 2003).

En 1988, el Consejo Forestal Australiano convoca a una conferencia en Canberra, de la que se concluye la necesidad de emplear modelos de comportamiento del fuego científicamente validados, en combinación con Sistemas de Información Geográfica para lograr una adecuada representación del comportamiento del fuego en distintos tipos de vegetación y terrenos.

Los sistemas que actualmente se utilizan, desarrollados sobre la base de las conclusiones de dicha conferencia, se componen de índices que se relacionan directamente con la probabilidad de ignición, la velocidad de propagación y las dificultades de supresión, en diferentes tipos de pastizales y bosques específicos, y proporcionan una base para la explicación del comportamiento del fuego en dichas unidades de vegetación.



La base del sistema está en el cálculo del contenido de humedad de los combustibles finos y de los combustibles pesados, datos que son derivados de la temperatura del aire y de la humedad relativa (combustibles finos). Para los combustibles pesados el contenido de humedad es determinado, empleando el Índice de Sequía de Keetch-Byram.

### **13.2. EVALUACIÓN DEL GRADO DE PELIGRO EN CHILE**

En 1987, y sobre la base de algunas investigaciones realizadas por las Universidades de Chile y Austral, se sientan las bases de un programa nacional de investigación para el manejo del fuego (Julio, 1987). Dentro de las líneas de investigación propuestas, se incluye la evaluación del grado de peligro de incendios forestales.

A partir de las prioridades definidas en las líneas de investigación propuestas, Julio (1990) propone un índice global de riesgo y 15 índices específicos para las zonas que en mayor grado eran afectadas por incendios forestales en la época. Para ello, se realizó un trabajo de investigación cuya zona de trabajo correspondió a la totalidad del territorio comprendido entre la V y la X regiones de Chile.

La delimitación de las 15 zonas de riesgo consideró la evaluación de variables como la Pluviometría media de otoño, primavera y verano; la temperatura media y la máxima de enero; la nubosidad media anual; el número de meses secos anuales; la humedad relativa media de enero; la densidad de incendios forestales; la densidad poblacional; la distribución general de la vegetación; y la distribución general de la topografía. La unidad de superficie de referencia correspondió a la carta par de letras del sistema GEOREF.

Respecto de la Información Meteorológica, se recolectaron datos sobre temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y velocidad del viento. Aunque se había considerado la recolección de antecedentes sobre nubosidad, radiación solar y evaporación; no se pudo incorporar estas variables debido a que no todas las estaciones meteorológicas contaban con datos completos o confiables.

Para la evaluación de la sequía se elaboró un indicador que permitiera conocer la condición de la vegetación en cuanto a su contenido de humedad y a la consecuente susceptibilidad a la ignición o inicio de incendios forestales. La determinación del factor de sequía consideró el estudio de 94 eventos de precipitación de variadas intensidades y registradas en diferentes sectores del área de estudio, entre los meses de noviembre y abril en el período 1985-1988.

Cada uno de estos eventos fue relacionado con la ocurrencia de incendios forestales en los días siguientes del respectivo sector, para obtener una función que asociara la cantidad de agua caída con la condición de la vegetación en días posteriores.

La estacionalidad puede ser definida como los períodos o lapsos, durante una temporada, donde la ocurrencia tiende a presentar una determinada intensidad, debido al efecto conjunto de factores como condición climática, estado general de la vegetación y tipo o nivel de actividad humana (Brown y Davies, 1973).

En este caso, para evaluar la estacionalidad se consideraron el riesgo generado por las actividades humanas durante el transcurso de la temporada y la condición esperada de la vegetación como consecuencia de su estado fisiológico independientemente del efecto de las precipitaciones de verano. Sin embargo, ante la ausencia de antecedentes cuantitativos que permitiesen la elaboración de una fórmula, se siguió un procedimiento cualitativo cuyos coeficientes fueron seleccionados a partir de correlaciones con los respectivos promedios de la ocurrencia para el total del período en estudio. De acuerdo con esto, lo más adecuado era el empleo de una escala de 1 a 3 a un nivel de significancia de 0,001.

Las pruebas estadísticas efectuadas, demostraron que la función que representaba con una mayor confiabilidad el riesgo de incendios forestales en Chile, era una regresión lineal múltiple con cinco variables independientes: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, factor de sequía y factor de estacionalidad.

Por medio del análisis de la distribución de los resultados del índice, aplicado para el total del área de estudio, y para las cuatro temporadas consideradas, se establecieron cinco categorías de riesgo (Extremo, Alto, Medio, Bajo y Nulo) para calificar los puntajes obtenidos en la aplicación de la fórmula.

Aunque las pruebas de validación otorgaron una suficiente confiabilidad a los índices desarrollados, de acuerdo con las palabras del autor del estudio, no pueden ser considerados como definitivos (Julio, 1990). Esta afirmación se basa en el hecho que para algunas de las variables incluidas en el índice, no se contó con información absolutamente satisfactoria, debido a que o la información no era completa, o simplemente no se contaba con ella en particular respecto de la evaluación de la estacionalidad.

Al respecto, cabe mencionar que en el caso de la sequía, se contaba con antecedentes sobre la evaluación del contenido de humedad de la vegetación (Bahamóndez, 1983). Sin embargo, en cuanto a la incidencia del ser humano en la ocurrencia de incendios no se encontró ningún estudio publicado con anterioridad, de modo que dichos antecedentes sólo fueron incluidos en forma provisoria en el índice. Esta situación se mantiene hasta la actualidad.

Correa (1998) realiza una evaluación del índice de riesgo en la V Región, concluyendo que los resultados que entrega la aplicación del índice en la quinta región tienen una buena correlación con los montos de ocurrencia registrados en el período analizado (1990/91 a 1995/96).

Sin embargo, en la ejecución de su estudio el autor detecta algunas distorsiones que afectan indudablemente la confiabilidad de los resultados del índice; entre ellos, errores de digitación, problemas en la delimitación espacial de las áreas de cobertura de las estaciones meteorológicas empleadas para evaluar el índice, y alguna incidencia de incendios de origen intencional (factor de estacionalidad). Por otra parte, indica que los procedimientos de cálculo y uso del índice en la Quinta Región no eran adecuados, lo que afectaba directamente a la relación entre los valores del índice y la ocurrencia real registrada.

La conclusión final de dicho estudio indica que la baja confiabilidad atribuida al índice de riesgo radica en problemas en los procedimientos de cálculo, descartando errores en los coeficientes o diseño general de las ecuaciones.

Entre 1993 y 1996, el Proyecto *“Diseño y Desarrollo de un Sistema de Prognosis y Gestión para el Control de Incendios Forestales en Chile”* (Proyecto FONDEF FI-13, 1995), cuyo propósito fue el diseño e implementación de una serie de herramientas para apoyar la gestión de la protección contra incendios forestales en Chile, también aborda el problema de la evaluación del Riesgo de Incendios en la zona de trabajo del Proyecto (VII a X regiones).

Aunque los desarrollos alcanzados en este proyecto representan un avance significativo en las herramientas destinadas al apoyo de la toma de decisiones estratégicas y operativas en manejo del fuego, no se realizan modificaciones de fondo al índice de riesgo de incendios. Al respecto, en la implementación del módulo respectivo, sólo se introducen algunas modificaciones para mejorar la expresión espacial de las variables contenidas en el índice de Julio (1990), posibilitando la visualización de mapas de riesgo para el área de interés contenida en el sistema. Las mejoras incorporadas tienen que ver con el ingreso e interpolación de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) para lo cual se emplearon los mapas de los distritos agroclimáticos elaborados por Santibáñez y Uribe (1993) y el módulo de simulación de campos de viento desarrollado en el mismo proyecto (González *et al.*, 1995).

Utilizando un algoritmo de interpolación, incluido en el módulo meteorológico del sistema, se posibilitó la extrapolación de valores para las variables meteorológicas señaladas, para el área de interés, a partir de algunas observaciones puntuales referidas a cada uno de los distritos agroclimáticos existentes en la zona de operaciones y contenidos en la base de datos del sistema.

Por otra parte, algunas compañías privadas también han enfrentado este problema, desarrollando algunas aproximaciones que les permiten definir su nivel o estado de alerta. Sin embargo, aunque estas herramientas han

resuelto el problema del estado de alerta de la organización, no permiten la realización de pronósticos o estimar el grado de peligro para la totalidad del área de responsabilidad, por cuanto se basan casi exclusivamente en el análisis de variables meteorológicas, las que aunque explican la condición de la vegetación, no tienen relación con la probabilidad de inicio de incendios, ni tampoco permiten la estimación de los otros componentes del grado de peligro.

### **13.3. CONCLUSIONES**

Del análisis de los indicadores de grado de peligro de incendios forestales desarrollados en el extranjero y en Chile, se puede observar con claridad que en todos ellos las variables meteorológicas tienen una importancia fundamental, por cuanto son las que determinan la condición o susceptibilidad a la ignición de los combustibles existentes en una zona determinada.

Dentro de ellas, las variables que aparecen en la mayoría de los indicadores corresponden a la precipitación (acumulada), la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. Todas ellas tienen una relación directa con la velocidad a la que se produce el proceso de desecación de la vegetación.

Otro aspecto importante, que tiene relación con el mismo punto, tiene que ver con la captura de la información meteorológica. Los sistemas de evaluación del grado de peligro de incendios forestales más desarrollados (Estados Unidos, Canadá) basan la operación de todo el sistema, en los datos capturados por redes de estaciones meteorológicas, las que envían sus datos a centros nacionales de cómputo, donde se realizan los procesos de cálculo necesarios para la elaboración y publicación de cartografía de riesgo y peligro de incendios para la zona bajo responsabilidad de protección de cada servicio.

Aunque en nuestro país se han desarrollado esfuerzos en la línea de generar indicadores para la Evaluación del Grado de Peligro de Incendios, hay que

hacer notar que se registra un atraso de al menos 10 años en el desarrollo de herramientas de evaluación y análisis del tipo que se ha descrito en estas páginas.

Esto se debe, principalmente, a la carencia de datos suficientemente confiables sobre el comportamiento de las variables meteorológicas en diferentes regiones, ante la imposibilidad de contar con una red de estaciones meteorológicas que permita la captura de datos suficientes para desarrollar y ajustar modelos predictivos de la condición de la vegetación.

Hoy, en la VIII Región se cuenta con una red de estaciones meteorológicas que permitirá resolver la primera parte del problema del riesgo y peligro de incendios, dado que la captura de datos meteorológicos en tiempo real posibilita la construcción de una base de datos suficientemente amplia (en términos de extensión geográfica y de dispersión de datos) la que en el corto o mediano plazo permitirá la construcción de modelos predictivos para estimar la condición de la vegetación.

La segunda parte del problema (la iniciación de incendios por parte de las actividades o actitudes humanas) puede ser resuelta en una primera aproximación mediante el estudio de la distribución de probabilidades asociada a la iniciación de incendios en la región.

La construcción de una herramienta que permita simular los incendios que se iniciarán durante una temporada en la región, en conjunto con un estimador de la condición de la vegetación, permitirá el desarrollo de un sistema de evaluación del grado de peligro de incendios forestales, actualizado y completo, cuyos resultados pueden ser fácilmente publicados en la Internet como medio de difusión masiva.

### 13.4. LITERATURA CITADA

Bahamondez, P. 1983. Modelo de tablilla indicadora de evaluación del grado de peligro de incendios forestales. Tesis Ing. Forestal, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 53 pp.

Brown y Davis, 1973. Forest Fire Control and Use. Second Edition, McGraw Hill, New York, 686 p.

CIFFC. 2002. Glossary of Forest Fire Management Terms. Canadian Interagency Forest Fire Centre. Winnipeg, Manitoba, Canadá, 47 pp.

Correa, L. 1998. Evaluación del Índice de Riesgo de Incendios Forestales para la Quinta región del país. Memoria de Título Ing. Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 98 pp.

Deeming, J. E. 1995. Development of a Fire Danger Rating System for East Kalimantan, Indonesia. IFFM report contract No 1-60134345.

Deeming, J. E; Burgan, R.; Cohen, J. 1978. The National Fire Danger Rating System. USDA Forest Service, General technical Report INT-39. USDA Forest Service, USA.

Dentoni, M; Muñoz, M. 2003. Sistemas de Evaluación de Peligro de Incendios. Plan Nacional de Manejo del Fuego, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ministerio de Salud y Ambiente, Buenos Aires, Argentina.

González, R.; Kottow, D; Zanotti, I.; Viveros, P. 1995. Modelamiento de Vientos. En: Actas del Taller Internacional sobre Prognosis y Gestión en el Control de Incendios Forestales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Pp 205-209.

Julio, G.; 1987. Identificación de líneas y anteproyectos de investigación en manejo del fuego. Inf. Conv. N°116, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral, Valdivia, 28 p.

Julio, G. 1990. Diseño de Índices de Riesgo de incendios forestales para Chile. Revista Bosque 11(2): 59-72. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral, Valdivia.

Julio, G. 1999. Fundamentos de Manejo del Fuego. Manual Docente. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 300 pp.



Keetch, J; Byram; G. 1968. Drought Index for forest fire control. USDA Research paper SE-38. Southeastern Forest experiment Station. USA.

Nesterov, V. 1949. Combustibility of the forest and methods for its determination. USSR State Industry Press. USSR.

Pedernera, P; Castillo, M. 2003. Vigencia del Índice de Riesgo de Incendios Forestales en Chile. Actas XX Reunión del Consejo Técnico de Manejo del Fuego. Corporación Nacional Forestal, Temuco, Chile.

Proyecto FONDEF FI-13. 1995. Kitral: Sistema de Prognosis y Gestión para el Control de Incendios Forestales. En: Actas del Taller Internacional sobre Prognosis y gestión en el Control de Incendios Forestales. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Pp 242-254.

Santibáñez, F.; Uribe, J. 1993. Atlas Agroclimático de Chile. Ministerio de Agricultura, Fondo de Fomento de Investigación Agropecuaria, Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile, 99 pp.

Van Wagner, C.E.; 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Canadian Forest Service. TR-35. Ottawa, Canadá.

Viegas, X.; Bovio, G.; Ferreira, A.; Nosenzo, A.; Sol, B. 1999. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. International Journal of Wildland Fire 9(4): 235-246.

## CAPÍTULO 14

### REFERENCIAS PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA NACIONAL DE PRONÓSTICO DE INCENDIOS FORESTALES

*Autor*

**Guillermo Julio Alvear**

Ingeniero Forestal

Laboratorio de Incendios  
Forestales

Facultad de Ciencias Forestales

Universidad de Chile

[gjulio@uchile.cl](mailto:gjulio@uchile.cl)

La expresión “Pronóstico de Incendios Forestales”, también conocida como “Evaluación del Grado de Peligro” o “Forest Fire Danger Rating”, debe interpretarse como un proceso orientado a estimar los problemas o efectos que se generarán como consecuencia del riesgo y del peligro que probablemente afectarán en un futuro inmediato y mediano a los recursos naturales renovables de una zona determinada.

El proceso debe incluir, además de la evaluación de las condiciones ambientales relacionadas con la probabilidad de inicio y propagación del fuego, y de los consiguientes daños directos e indirectos que puedan producirse, el empleo de índices o indicadores basados en esos resultados, que faciliten la toma de decisiones requeridas para reducir o evitar los problemas potenciales que podrían derivarse. Es decir, acciones tales como la prevención, la detección, la programación temprana de operaciones de supresión, el despacho, el combate, el uso del fuego y la planificación misma del manejo del fuego, requieren, dentro de un marco razonable de eficiencia esperada, fundamentarse, organizarse y ejecutarse sobre la base de los pronósticos de riesgo, peligro y daños.

En consecuencia, un sistema de pronósticos de incendios forestales debe necesariamente concebirse como un componente básico del manejo del fuego, porque el objetivo fundamental que se persigue es justamente eliminar o mitigar los problemas que puedan generarse con la iniciación, propagación y conflictividad de eventuales incendios.

Por consiguiente, los pronósticos podrían calificarse en tres categorías, dependiendo de la oportunidad o momento en que se desea evaluar el grado de peligro, y del tipo de acciones de manejo del fuego que pueden aplicarse de acuerdo a los resultados que se obtengan.

**14.1.1.** La primera categoría está referida a las contingencias en tiempo real, producidas por uno o varios incendios que ya se han iniciado y reportados a una central de operaciones. En este caso, el pronóstico estará referido al potencial comportamiento del fuego, en un lapso en el cual las condiciones

ambientales y meteorológicas que afectan al incendio ya son conocidas y, por lo tanto, es posible simular su velocidad de expansión, modelo de propagación, niveles de conflictividad y posibles daños. La información generada por la simulación es útil en los siguientes aspectos:

- a) En el despacho, en relación a los tipos y cantidades de recursos de combate que requieren movilizarse, en atención al esfuerzo estimado para el control y a las especificaciones mismas para las operaciones que se prevén.
- b) En la estrategia de combate, respecto a los tipos de líneas de control, y las localizaciones y medios para establecerlas, con el fin de lograr la mayor eficiencia posible en la supresión del incendio.
- c) En situaciones de simultaneidad de incendios y limitaciones de recursos de combate para afrontar todos los eventos. La simulación permite jerarquizar los casos presentes, estableciendo un orden para la asignación de los medios disponibles, de modo de atender, prioritariamente, a aquellos que potencialmente signifiquen los mayores problemas o daños.

**14.1.2.** La segunda categoría se relaciona con la estimación de la ocurrencia de incendios en el plazo inmediato, esto es, en las próximas horas y días siguientes, por una extensión de tiempo que dependerá de la confiabilidad de los pronósticos meteorológicos y de la condición de los modelos de combustibles en los que posiblemente se origine y propague el fuego. Para este caso, la información de los pronósticos debe apoyar a las siguientes acciones:

- a) En la prevención, en el sentido de intensificar las actividades destinadas a evitar que los incendios se inicien en las zonas en que se prevé una mayor ocurrencia.
- b) En la detección, de modo de reforzar la vigilancia en los sectores donde se pronostica la iniciación de incendios, de manera de minimizar los tiempos de descubrimiento, localización y reporte.

- c) En la programación diaria de operaciones, a fin de ordenar el empleo de recursos disponibles para la presupresión y el combate, especialmente de aquellos móviles, a fin de concentrar la cobertura de las capacidades existentes en los sectores con mayores niveles de riesgo y peligro.
- d) En el uso del fuego y otras operaciones silvoagropecuarias, con la finalidad de restringir las actividades que representen riesgos de incendios en los sectores de mayor grado de peligro.

**14.1.3.** La tercera categoría es de carácter estratégica, referida a la situación general prevista para el mediano y largo plazo, en un horizonte futuro que podría fluctuar desde uno a varios años. El proceso, en este caso, se acostumbra abordar a través de la determinación de prioridades de protección, mediante la cual se planifica espacialmente el sistema de protección de modo de establecer un diseño para las operaciones de prevención, presupresión y combate que privilegie la cobertura de los sectores que observen los mayores niveles de riesgo, peligro y daño potencial.

## **14.2. EVOLUCIÓN DEL PRONÓSTICO DE INCENDIOS EN EL MUNDO**

Las referencias que a continuación se exponen, están referidas a la segunda de las categorías de pronósticos señaladas en la sección precedente. Es decir, respecto a la estimación del grado de peligro para un período futuro inmediato.

En ese contexto, la primera referencia bibliográfica conocida sobre pronósticos de incendios es del año 1886, cuando A. White, de Estados Unidos, se refiere en términos cualitativos sobre la importancia de la meteorología en la evaluación del grado de peligro. El tema es retomado en 1914 por E. A. Beals, quien menciona la necesidad de emplear la información meteorológica como una pauta para determinar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. Esta inquietud es recogida por S. B. Show, en 1918, cuando estableció para el Estado de California las primeras relaciones matemáticas entre factores

meteorológicos (velocidad del viento, tasa de evaporación y contenido de humedad de la vegetación) con variables tales como la probabilidad de ignición y la velocidad de propagación del fuego.

El primer índice de grado de peligro propiamente tal debe atribuírsele a H. T. Gisborne, del Servicio Forestal de Estados Unidos, quién en 1928 diseñó un sistema para establecer los diferentes niveles de problemas sobre inicio y comportamiento del fuego en relación a los factores meteorológicos y ambientales. Este índice, que lo denominó "Forest Fire Danger Measure", consideraba cinco variables (Rango de Visibilidad, Condición e Inflamabilidad del Combustible, Velocidad del Viento, Estación del Año y Número de Personas en el Bosque), las que al combinarse determinaban 120 situaciones diferentes, y que agrupó en siete clases, en las cuales se entregaban pautas de alerta, vigilancia y despacho de recursos de combate para las contingencias que podrían producir. Para estos efectos empleaba un conjunto de reglillas circulares que integraban la información de las variables, basado en una guía para la toma de fotografías.

A partir del índice creado por Gisborne, se inicia en Estados Unidos, Canadá y otros países una avalancha de propuestas de fórmulas para el pronóstico de incendios forestales. El hecho es que en 1950, solamente en Estados Unidos, ya estaban operando alrededor de 2.000 índices basados en esquemas distintos, la mayoría focalizados a zonas específicas, y orientados para diferentes propósitos, conformando una verdadera anarquía en la materia. Ante esta situación, el Servicio Forestal de Estados Unidos decidió, en 1959, iniciar el desarrollo de un Sistema Nacional de Evaluación del Grado de Peligro-NFDR (National Forest Fire Danger Rating System), concluyendo los resultados preliminares en 1963 y el diseño definitivo en 1972.

La estructura del NDFR contempla tres índices específicos (Ocurrencia, Carga y Combustión), cuyos resultados se integran para la determinación de un indicador global (Índice de Severidad). Los índices específicos se alimentan de la información proveniente de tres componentes del comportamiento del fuego (Ignición, Propagación y Energía Liberada), los que a su vez se basan en antecedentes derivados de estimaciones subjetivas (Riesgo Natural y Riesgo

Humano), estimaciones objetivas (Contenido de Humedad de Combustibles Muertos para las diferentes clases de Tiempo de Retardación, Contenido de Humedad de Combustibles Vivos, Pendiente y Modelos de Combustibles) y observaciones meteorológicas (Temperatura, Nubosidad, Humedad Relativa, Precipitaciones y Velocidad del Viento).

Por su parte, en Canadá se originó un proceso similar al de Estados Unidos, con la construcción de un primer índice en 1938, gracias a las investigaciones de Wright y Beall, que conformó las bases para iniciar, en 1970, el desarrollo de un Sistema Nacional de Evaluación del Grado de Peligro (Fire Weather Index – FWI). La estructura de la primera versión del FWI es publicada por C.E. van Wagner en 1974, y después de diversos procesos de validación y ajustes, el grupo de investigadores encabezado por B. Lawson publica, en 1993, el diseño definitivo del sistema.

El FWI es un rango numérico de la intensidad calórica de un eventual incendio que se pronostica, derivado de la combinación de los resultados de dos índices específicos: Propagación Inicial (ISI) y Combustión (BUI). Éstos se alimentan de las informaciones provenientes de tres componentes o códigos: Humedad de Combustibles Finos (FFMC), Humedad de la Hojarasca (DMC) y Factor Sequía (DC), los que a su vez operan sobre la base de información meteorológica (Humedad Relativa, Velocidad del Viento, Precipitaciones y Temperatura).

Diversos otros países, entre los cuales se destacan Australia, Francia, España, Japón y Rusia, han impulsado el desarrollo de sistemas de pronósticos de incendios forestales, los que conceptualmente no difieren significativamente a los elaborados en Estados Unidos y Canadá. Estos sistemas se han estabilizado en cuanto a sus conceptos y diseños, y no se prevén cambios significativos en los tiempos futuros próximos. Sin embargo, en sus aspectos instrumentales, se ha verificado un importante desarrollo gracias a los avances de la cartografía digital y a la captura de información basada en sensores remotos, por medio de satélites y estaciones meteorológicas automáticas, capaces de captar la energía que emiten los diversos elementos que componen la atmósfera y la superficie de la tierra, fundamentando el diseño de nuevos indicadores que



mejoran la eficiencia de los sistemas de evaluación del grado de peligro, como es el caso del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

### 14.3. EVOLUCIÓN DEL PRONÓSTICO DE INCENDIOS EN CHILE

La primera fórmula fue construida por G. Julio en 1968, y correspondió a un Índice de Ocurrencia, cuyo propósito era determinar la probabilidad de inicio de incendios. Se basó en coeficientes de correlación calculados entre los valores diarios de un sinnúmero de factores meteorológicos (quedando seleccionados la temperatura, la humedad relativa y la precipitación acumulada) y la ocurrencia de incendios para las 22 zonas de grado de peligro definidas para el país. Para cada una de estas zonas se ajustó la fórmula de acuerdo a las condiciones meteorológicas prevalecientes y sus efectos en la ocurrencia. Por ejemplo, para la Zona 5, que representaba el Valle Central entre las provincias de Santiago y Talca, la expresión era:

$$I = 4t + 3s + 2h$$

En donde “I” representaba la probabilidad de ocurrencia en una escala de 10 a 50 puntos (desde un nivel Bajo a uno Extremo), y “t”, “s” y “h” a alguna de las cinco clases de valores de temperatura, precipitación acumulada y humedad relativa, respectivamente, existentes en el momento de la determinación del grado de peligro.

Con el objeto de facilitar el cálculo del Índice de Ocurrencia, se confeccionó una regilla circular que permitía conocer el nivel de probabilidad, marcando directamente los valores de los tres factores meteorológicos.

Posteriormente, J. Dieterich, en 1973, modificó el índice siguiendo un procedimiento empírico, introduciendo a la velocidad del viento como un cuarto factor meteorológico en la determinación de la probabilidad de ocurrencia.

En 1987, G. Julio formuló las bases para el Programa Nacional de Investigación en Manejo del Fuego en el que, respecto a la determinación del grado de

peligro, propone los protocolos para el desarrollo de un sistema nacional de pronósticos de incendios forestales basado en cuatro índices específicos: Riesgo, Severidad, Propagación y Combustión. Adicionalmente, se contempló el procedimiento de integración de los resultados de los cuatro índices, con el propósito de diseñar un Índice Global o de Carga Total.

La propuesta fue recogida por el Consejo Técnico de Coordinación de Manejo del Fuego CONAF-Empresas Forestales, y encarga al grupo de investigación dirigido por G. Julio la elaboración del Índice de Riesgo. Los trabajos concluyeron en 1989 con una versión preliminar. El diseño definitivo se logró en 1991, después de un período de dos años de pruebas y validaciones.

El Índice de Riesgo se basa en una fórmula general que define la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en los diferentes sectores del territorio comprendido entre las regiones V y X, inclusives. Los resultados de la fórmula, calculada por medio de un análisis de regresión lineal múltiple y que a continuación se presenta, se califican en una escala de 0 a 100, segregada en cinco categorías de riesgo (Nulo, Bajo, Medio, Alto y Extremo).

$$y = 17,6653 + 1,1692x_1 - 0,4378x_2 + 0,3473x_3 + 18,6862x_4 - 0,2664x_5$$

En donde “y” es la probabilidad de ocurrencia diaria; “x<sub>1</sub>” la temperatura del aire en C°; “x<sub>2</sub>” la humedad relativa del aire en %; “x<sub>3</sub>” la velocidad del viento en nudos; “x<sub>4</sub>” es un factor de estacionalidad con valores que fluctúan entre 1 y 3 (según tabla); y “x<sub>5</sub>” un factor de sequía, con valores que fluctúan entre 0,5 y 70 (según tabla).

El Índice General puede ser reemplazado por 15 Índices Específicos que representan, en forma más precisa, a un mismo número de Zonas de Riesgo en que fue subdividido el territorio evaluado. Estos índices específicos mantienen la misma estructura y variables del índice general, variando solamente el factor de posición y los coeficientes de las variables independientes.

Posteriormente, con el desarrollo del Sistema Kitral, sobre Prognosis y Gestión en el Control de Incendios Forestales, construido en el período 1993-96 por un consorcio conformado por la Universidad de Chile (Facultad de Ciencias

Forestales y Centro de Estudios Espaciales), INTEC Chile y el Instituto Forestal, se crearon por medio de sus diferentes módulos un conjunto de indicadores para el pronóstico de incendios. Entre los más importantes cabe destacar:

- a) **Módulo de Riesgo.** Permite la operación del Índice de Riesgo.
- b) **Simuladores.** Expansión de Focos y Campos de Viento, que pronostica los modelos de propagación del fuego, los niveles de intensidad calórica y el esfuerzo de control Índices de Propagación, Combustión y Severidad.
- c) **Módulo de Despacho.** Pronostica los niveles de esfuerzos de control y define las bases para la programación diaria de operaciones y las opciones de asignación de recursos para el combate incendios forestales (Índice de Carga).
- d) **Módulo de Planificación.** Permite la determinación de prioridades de protección, sobre la base del pronóstico estratégico del riesgo, peligro y daño potencial, y fundamenta el diseño espacial de las operaciones de manejo del fuego.

Con posterioridad, especialmente en el último quinquenio, han surgido diversas iniciativas respecto a los pronósticos de incendios forestales, que corresponden a acciones aisladas y que esencialmente se refieren al mejoramiento de aspectos instrumentales, como la captura de información mediante satélites, la aplicación de tecnologías de información y comunicaciones, o bien, modelamientos meteorológicos. También se constatan algunos esfuerzos en la aplicación de sistemas e índices utilizados en el extranjero, particularmente desarrollados en Estados Unidos y Canadá, pero sin considerar el estudio de los necesarios ajustes a las condiciones prevalecientes en Chile.

## **14.4. COMENTARIOS SOBRE EL FUTURO DE LOS PRONÓSTICOS EN CHILE**

### **14.4.1. Necesidad de un Trabajo Mancomunado**

Es indudable que los esfuerzos que se realicen por consolidar y fortalecer los sistemas de pronósticos de incendios forestales deben ser aplicados a un nivel nacional, especialmente en el caso de Chile, en donde el manejo del fuego se lleva a efecto en una importante medida a través de acciones coordinadas entre las instituciones públicas y privadas que poseen responsabilidades en la protección de los recursos naturales renovables.

La experiencia de países que han alcanzado los mayores desarrollos en el tema, demuestra la conveniencia de integrar las capacidades de especialistas e instituciones en torno a un programa de trabajo global y mancomunado para lograr resultados efectivos, en el sentido de otorgar una adecuada satisfacción a las diversas demandas que en la materia plantean, tanto la Sociedad, como los diferentes actores involucrados en la materia.

Debe tenerse presente, siempre, que el tema de los incendios forestales se caracteriza por ser altamente complejo. Algunos de los argumentos que avalan esta afirmación se enuncian a continuación:

- a) La naturaleza estocástica y contingente de la ocurrencia de incendios forestales.
- b) La extensión, dispersión y variabilidad de escenarios en las operaciones de manejo del fuego.
- c) La diversidad y heterogeneidad de las funciones, especialidades y tareas involucradas.
- d) Los efectos en cadena que provocan los incendios forestales, que no sólo impactan a los propietarios de los terrenos afectados, sino que a la comunidad en general.
- e) La constante disyuntiva entre optar por la eficiencia o por la efectividad en la gestión de la protección.
- f) La conveniencia de acciones planificadas, en lo posible con decisiones

programadas anticipadamente, pero en ambientes que por lo general son de alta incertidumbre.

- g) La necesidad de la coordinación interinstitucional para los sistemas de manejo del fuego, los que a su vez están supeditados a administraciones superiores, y éstas a la exigencia de un alto grado de plasticidad en sus propios esquemas organizacionales ante la contingencia de los incendios.

Los argumentos recién señalados llevan a la conclusión de establecer una profunda normalización de las actividades de manejo del fuego, la que requiere ser asumida, principalmente, por las organizaciones que poseen las mayores responsabilidades en la materia, aspectos como las competencias laborales, los estándares de productividad, las especificaciones de protocolos y esquemas de organización y la selección de equipos. Incluso hasta la terminología y la conceptualización de los componentes de la prevención, presupresión y combate debieran estar regulados para todo el país, de otra forma la ineludible interacción entre los actores participantes no será eficiente.

Lo anterior es fundamental en el tema de los pronósticos de incendios forestales, por la profunda transversalidad y efecto que poseen en el ejercicio de las diversas actividades del manejo del fuego. Tanto los objetivos del sistema de índices, como su diseño, implementación y uso, debieran establecerse como una normativa única y válida para todas las instituciones. En tal sentido, si bien no es posible restringir las iniciativas aisladas de personas o instituciones por impulsar nuevos avances en el tema, se requerirá hacer todo lo posible para que ellas se encaucen dentro de un programa integral de interés común. En Chile se evidencia una precaria capacidad para la investigación y desarrollo en manejo del fuego y, como es obvio, sería irracional utilizarla en acciones aisladas, no coordinadas, paralelas o desperfiladas.

#### **14.4.2. Referencias sobre la Tarea Futura**

Se considera que las tareas que debieran impulsarse para consolidar el desarrollo de los sistemas de pronósticos de incendios forestales para Chile,

no debieran estar referidas, preferentemente, a las fórmulas que hasta la fecha se han utilizado. Si bien es conveniente revisar periódicamente los índices en uso y mejorarlos o modernizarlos, en los aspectos que sean necesario producto de sus evaluaciones, se estima que el problema principal reside en la insuficiencia y baja confiabilidad de la información disponible, y de las limitadas capacidades actuales para su captura, disseminación y empleo de sus resultados.

Sobre el problema de la insuficiencia y baja confiabilidad de la información, cabe señalar tres aspectos preponderantes a considerar en el desarrollo de los sistemas de pronósticos:

- a) Estado atmosférico (factores meteorológicos), en cuanto a su influencia en la ignición y propagación e intensidad de los incendios, en esquemas de predicción en tiempo real, en un plazo inmediato (horas siguientes) y en el corto plazo (desde uno a varios días).
- b) Ambientes presentes en la superficie terrestre (modelos de combustibles, condición de la vegetación, topografía) que influyen en el comportamiento potencial del fuego y en el esfuerzo de control.
- c) Tipología y distribución espacial del comportamiento del riesgo humano, relacionado con la causalidad de incendios, también en esquemas predictivos para el tiempo real, plazo inmediato y próximos días.

Respecto a las capacidades para capturar, disseminar y utilizar la información, se estima importante referirse a los siguientes aspectos:

- a) La evaluación de los diferentes medios alternativos factibles de emplear para identificar, recolectar y transferir o transmitir los antecedentes requeridos en los ámbitos meteorológicos, comportamiento del fuego y riesgo humano antes mencionados.
- b) El diseño de los protocolos de calificación y procesamiento de la información, de acuerdo a los propósitos que se definan, especialmente

respecto a los componentes o factores a considerar en los índices específicos que conformen el sistema de pronósticos.

- c) Los mecanismos de difusión de los resultados de los índices del sistema de pronósticos, considerando principalmente a los usuarios de la información (centrales de operación y operadores de manejo del fuego), y también respecto a los grupos humanos de riesgo que requieren sensibilizarse de modo preventivo.
- d) La elaboración de las pautas de interpretación y utilización de los resultados generados por el sistema de pronósticos por parte de los operadores del manejo del fuego, con el objeto de lograr un efectivo apoyo en la planificación, programación y ejecución de las diferentes tareas comprendidas en la prevención, presupresión, combate y uso del fuego.

Como se podrá apreciar del análisis de los dos grupos de aspectos recién expuestos, se constata que el desafío en investigación y desarrollo tecnológico para el establecimiento de un sistema nacional de pronósticos de incendios forestales será una tarea de gran envergadura, si es que se toma la decisión de abordarla a través de un proceso que asegure la calidad, cobertura y utilidad esperadas.

Estratégicamente, lo recomendable sería formular un proyecto global sobre la construcción del sistema de pronósticos y, posteriormente, de acuerdo a las prioridades que se definan, establecer el cronograma de trabajo de diseño e implementación requerido para avanzar gradual y sostenidamente, de acuerdo a las capacidades de investigación y desarrollo con que realmente se disponen. Lógicamente, la velocidad y eficiencia del proceso será directamente proporcional al nivel de decisión de trabajo interinstitucional e interdisciplinario que se adopte.

Por otra parte, aunque pareciera significar un aspecto menor, la capacitación del personal de los programas de manejo del fuego respecto a los pronósticos de incendios posee una alta relevancia, por lo que requiere ser considerada

debidamente. Al respecto, cabe recordar que en el uso del Índice de Riesgo en Chile se han formulado permanentemente críticas referidas a su baja confiabilidad. Si bien está claro que esta fórmula requiere modernizarse, porque se elaboró ya hace cerca de 15 años, y en condiciones muy diferentes a las actuales, las diferentes evaluaciones realizadas han demostrado su alta confiabilidad, y que los problemas denunciados realmente corresponden al desconocimiento del modo de operación de la fórmula, o bien, por el empleo de antecedentes incorrectos para alimentar su funcionamiento.

#### **14.5. LITERATURA CITADA**

Deeming, J. E., Lancaster, B. N., Fosberg, M. A., Furman, R. W., Schroeder, M. J. 1972. National Fire Danger Rating System. USDA Forest Service, Res.Pap. RM-84., Fort Collins. 165 p.

Gisborne, H. T. 1936. The Principles of Measuring Forest Fire Danger. *Journal of Forestry*, 34:786-793.

Julio, G. 1990. Diseño de un Índice de Riesgo de Incendios Forestales para Chile. *Bosque*, 11(2):59-72.

Julio, G. 2001. La Investigación del Manejo del Fuego en Chile-Avances y Proyecciones. Actas XVIII Jornadas de Evaluación del Manejo del Fuego. Consejo Técnico de Coordinación CONAF/Empresas Forestales. Concepción, 10 p.

Julio, G., Castillo, E., Pedernera, P. 1995 Diseño Funcional de Simulador de Incendios Forestales. Actas taller Internacional Prognosis y Gestión en Control de Incendios Forestales. Proyecto FONDEF FI-13, Santiago, pág. 182-204.

Lawson, B. A., Stocks, B. J., Alexander, M. E., Van Wagner, C. E. 1985. A System for Predicting Fire Behavior in Canadian Forests. Proc. IX Conference Fire and Forest Meteorology, pag 6-10.

Turner, J. A., Lillywhite, I. M., Piezlak, Z. 1961 Forecasting for Forest Services. *World Metheo.Org., Techn.Report N° 42.*, 55 p.

Vélez, R. 2000. La Defensa contra Incendios Forestales -- Fundamentos y Experiencias. Mc Graw Hill, Madrid. 1050 p.



## CAPÍTULO 15

### **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA DE INCENDIOS FORESTALES PARA CHILE**

*Autor*

**Luis H. Valenzuela P.**  
Ingeniero Forestal  
Corporación Nacional Forestal  
lvalenzu@conaf.cl

## 15.1. RESUMEN

Se realiza una breve descripción de la situación de los incendios forestales en Chile, con especial énfasis en el incremento sostenido de la ocurrencia y la variabilidad en la superficie dañada, Así como de las características del funcionamiento del Sistema de Protección Civil, en razón de la importancia social y económica que generan los incendios al transformarse en emergencias. Además, se explica, a grandes rasgos, la situación que enfrentan las organizaciones de protección de que disponen la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y las grandes empresas forestales, toda vez que el único Índice de Riesgo de Incendios Forestales disponible en el país no ha podido ser mejorado desde que fue desarrollado en 1990 debiendo generar metodologías propias para cubrir las debilidades detectadas.

Se presenta una propuesta de Sistema de Alerta Temprana de Incendios Forestales, con el propósito de orientar el desarrollo de metodologías que superen el impasse en que se encuentra el desarrollo tecnológico del país, siendo superado con cierta rapidez por otros países de latinoamérica con menor desarrollo en el campo del control de los incendios forestales. Esto provoca un freno en el logro de nuevos niveles de eficacia y eficiencia en el control de los incendios forestales. Se hace énfasis en el desarrollo de un modelo de pronóstico de la ocurrencia y propagación de los incendios forestales, que sirva no sólo a especialistas en manejo del fuego, sino que también sea la base para la protección civil y para los requerimientos de los ciudadanos y propietarios medianos, integrando el conocimiento de equipos multidisciplinarios y multilaterales en el desarrollo de los índices y productos factibles de obtener en la aplicación del modelo.

Existen dos aspectos claves en el éxito de implantar un sistema como el propuesto. Uno de ellos tiene que ver con el necesario rol de liderazgo de la CONAF, así como de la participación de grandes empresas forestales y de las Universidades Chilenas, por lo que un acuerdo entre ellos es de vital importancia para el desarrollo tecnológico que pueda alcanzar el país en los próximos años. Otro aspecto tiene que ver con separar las funciones de investigación de aquellas de comercialización y distribución de la información,

puesto que se ha observado, en situaciones pasadas, que la mezcla de dichas funciones en un sólo actor ha derivado en fracaso, principalmente debido a la altísima especialización de cada una de ellas.

## **15.2. EL MANEJO DEL FUEGO EN CHILE**

### **15.2.1. Características de los incendios forestales**

De acuerdo a lo dispuesto en el D.S. 733 de 1982, la protección contra incendios forestales en Chile se realiza a través de actividades de prevención, presupresión y supresión o combate. En consecuencia, estas actividades constituyen una tarea normal y fundamental de responsabilidad del Ministerio de Agricultura, quien la ejerce a través de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Ésta tiene por función asegurar el desarrollo de las actividades de protección contra incendios forestales. Es a Carabineros de Chile, a quien le corresponde, en el orden estrictamente policial, la fiscalización y control de todas las normas que regulan estas materias, además de practicar la investigación de las causas de esta clase de siniestros.

La promulgación de esta norma legal ha permitido reafirmar el rol asumido por el Estado desde 1962, fecha en la cual inició la protección de los recursos naturales frente a la amenaza de los incendios forestales. Paralelamente, a partir de mediados de la década del '70 el Estado asumió un rol subsidiario en la gestión productiva del país, lo que ha implicado que a partir de 1979 las grandes empresas forestales han asumido las tareas de prevenir y combatir los incendios forestales que amenacen o afecten su patrimonio, alcanzando a la fecha un nivel de desarrollo técnico y eficiencia notable.

El fondo del problema es que durante los últimos años se registra un promedio aproximado de 6.400 incendios forestales anuales en Chile (Conaf, 2005), los cuales se distribuyen geográficamente aproximadamente entre los 32° y 53° de Latitud Sur, concentrándose particularmente entre las latitudes 36° y 38° de Latitud Sur, correspondiente en términos administrativos a la VIII Región del Bío Bío. Esta ocurrencia ha experimentado un incremento significativo en

los últimos 25 años, llegando a superar los 7.500 incendios en la temporada 2002-2003 comparado a menos de 1.000 incendios por temporada antes de 1972. Este incremento pareciera aún no alcanzar su punto máximo, porque no se observa una declinación del número de incendios a pesar de los esfuerzos realizados por los programas de prevención desarrollados por las empresas privadas y la CONAF. Tradicionalmente, la ocurrencia de incendios forestales se concentraba en la zona de clima mediterráneo, la cual se extiende desde la Región de Valparaíso hasta la del Bío Bío. Sin embargo, en los últimos años se observa un incremento significativo en las zonas templadas que incluye la IX y X regiones de Chile (Peña, E.; Valenzuela, L., 2004).

A la mayor ocurrencia de incendios forestales se agrega el hecho que en las últimas temporadas, por una mayor carga de combustible y clima más seco, la intensidad del fuego es mayor y muchos de los incendios llegan a tener características catastróficas, siendo muy difíciles de controlar, y alcanzando consecuencias graves para la población, la seguridad de los combatientes y generando un impacto ambiental más negativo (Peña y Valenzuela, 2004).

#### **15.2.1.1. Incremento de la ocurrencia de incendios**

La interacción de las características de las plantaciones, su ambiente físico y el entorno social ha dado origen a una condición de alto riesgo y peligro de incendios forestales, lo que se traduce en una alta ocurrencia anual, que en la década 1994-2003 superó los 5.600 incendios anuales (Figura 15.1 y Cuadro 15.1), con un promedio de más de 50.000 hectáreas quemadas en cada temporada.

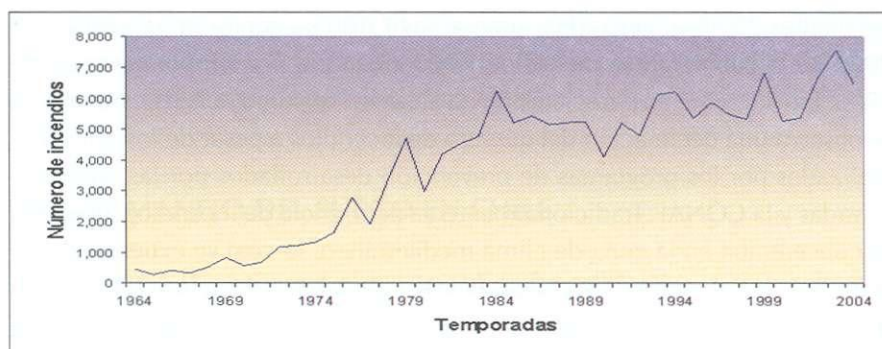


Figura 15.1. Número total de incendios por temporada para Chile (cada temporada se extiende desde octubre hasta abril del siguiente año. El valor que se indica para la temporada corresponde al año en que ésta terminó).

Por otra parte, se observa en el Cuadro 15.1 el nivel de eficacia que ha logrado el país en el control de los incendios forestales, puesto que ha pasado de un promedio de 70 ha/inc en el quinquenio 1963 – 1968 a pérdidas de 8 ha/inc durante el quinquenio 1998 – 2003. Este logro lleva implícito el aporte que ha significado para el país la participación de las grandes empresas forestales, las cuales invierten aproximadamente el doble que el Estado para proteger superficies significativamente menores. También tiene implícito el esfuerzo que realizan los funcionarios de CONAF en la lucha contra los incendios forestales.

Cuadro 15.1. Ocurrencia y daño de incendios forestales en Chile por quinquenio, temporadas 1965-2003.

| Quinquenios | Número de incendios | Superficie Afectada promedio (ha) | Superficie promedio afectada por incendio (ha/inc) |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1963 - 1968 | 383                 | 26,767                            | 70                                                 |
| 1968 - 1973 | 883                 | 39,682                            | 45                                                 |
| 1973 - 1978 | 2207                | 21,891                            | 10                                                 |
| 1978 - 1983 | 4239                | 40,679                            | 10                                                 |
| 1983 - 1988 | 5451                | 69,853                            | 13                                                 |
| 1988 - 1993 | 5090                | 47,617                            | 9                                                  |
| 1993 - 1998 | 5653                | 53,269                            | 9                                                  |
| 1998 - 2003 | 6346                | 52,348                            | 8                                                  |

Fuente: Soto 1995 y CONAF 2003.

Los registros llevados por la CONAF indican que, en los últimos años, la mayor parte de la ocurrencia de incendios forestales se encuentra en la VIII y IX regiones (Cuadro 15.2), coincidiendo con la distribución de las plantaciones de las cuales al menos el 50 por ciento está establecido en dichas regiones. La explicación a esta concentración de la ocurrencia está dada porque en estas regiones hay una alta concentración de plantaciones, buena accesibilidad a las áreas plantadas, gran concentración de población humana, el bosque rodea las ciudades y todo esto se conjuga con un clima mediterráneo, lo que crea condiciones propicias para que ocurran incendios forestales. Más al norte, aún cuando el clima es mediterráneo, no existen plantaciones en forma continua y su crecimiento es menor (menos carga de combustible). Al sur de la IX Región, la temperatura es más baja, se concentra una mayor superficie cubierta por bosques naturales y el combustible se mantiene con un mayor contenido de humedad.

**Cuadro 15.2.** Ocurrencia de incendios forestales en Chile por región en el último quinquenio.

| PERIODO         | NUMERO DE INCENDIOS POR REGION |           |              |            |            |            |              |              |            |           |           |              |
|-----------------|--------------------------------|-----------|--------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|------------|-----------|-----------|--------------|
|                 | III                            | IV        | V            | RM         | VI         | VII        | VIII         | IX           | X          | XI        | XII       | TOTAL        |
| 2000 – 2001     | 5                              | 32        | 1.036        | 543        | 267        | 327        | 1,839        | 1,194        | 112        | 7         | 12        | 5,374        |
| 2001 – 2002     | 12                             | 18        | 1,318        | 447        | 245        | 281        | 2,183        | 1,32         | 767        | 48        | 62        | 6,701        |
| 2002 - 2003     | 39                             | 73        | 1,086        | 573        | 238        | 513        | 3,186        | 1,541        | 283        | 15        | 26        | 7,573        |
| 2003 - 2004     | 24                             | 80        | 875          | 743        | 292        | 465        | 2,277        | 1,277        | 346        | 37        | 14        | 6,43         |
| 2004 - 2005     | 31                             | 42        | 956          | 496        | 279        | 403        | 2,745        | 1,391        | 249        | 32        | 29        | 6,653        |
| <b>PROMEDIO</b> | <b>22</b>                      | <b>49</b> | <b>1,054</b> | <b>560</b> | <b>264</b> | <b>398</b> | <b>2,446</b> | <b>1,345</b> | <b>351</b> | <b>28</b> | <b>29</b> | <b>6,546</b> |

Fuente: Conaf, 2005.

#### 15.2.1.2. Magnitud del daño de los incendios forestales

Al analizar el daño por temporada, se observa que éste muestra una tendencia a oscilar entre las 40 a 50.000 ha, pero presenta grandes variaciones entre temporadas (Figura 15.2). Una situación extrema de esta variación se presenta en la temporada 1998-1999, cuando se quemaron más de 100.000 ha. Dos años después (temporada 2000-2001), la superficie quemada alcanzó el segundo mínimo histórico de 10.804 ha.

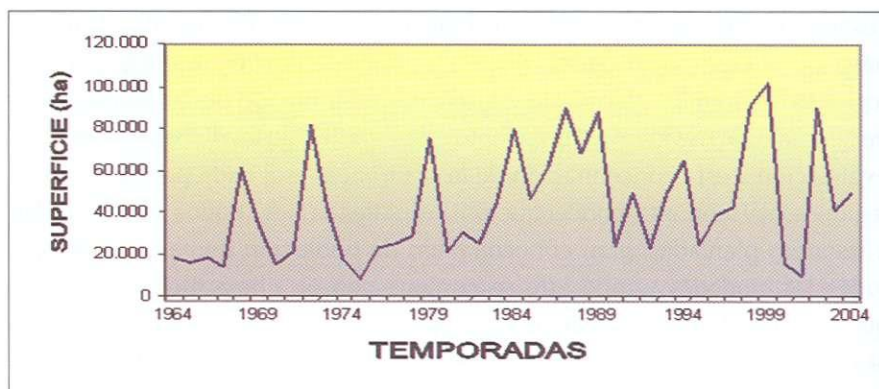


Figura 15.2. Superficie total (ha) afectada por los incendios forestales por temporada en Chile.

Para que algunos incendios lleguen a dañar grandes superficies, se requiere que la ocurrencia del foco coincida con años de sequías y/o días en los cuales se alcanza alta temperatura, baja humedad relativa y vientos que superen 30 km por hora. Las condiciones descritas anteriormente se dan ocasionalmente en Chile. De las 40 temporadas para las cuales existen registros de ocurrencia de incendios forestales, nueve de ellas (25 por ciento aproximadamente) muestran un daño superior a las 60.000 ha (Peña y Valenzuela, 2004).

En el promedio de los pasados diez años, el número de incendios mayores a 200 hectáreas, calificados por CONAF como incendios de magnitud, ha sido de 40 eventos, es decir, sólo el 0,66% de la ocurrencia. Sin embargo, este escaso número ha ocasionado la mayor superficie afectada, equivalente al 67,2% del daño total (Conaf, 2005).

### 15.2.2. Procedimientos actuales para realizar pronósticos de incendios

En Chile, actualmente no se dispone de un sistema de alerta propiamente tal, por cuanto la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) establece diariamente niveles de alerta con la información emanada de la Dirección de Meteorología, pero sin que esté sustentada en metodologías y estudios



relacionados con el riesgo de incendios forestales. Por otro lado, CONAF y las grandes empresas forestales han desarrollado metodologías y criterios propios para definir alertas. El gran problema de esta situación es que los actores señalados no interactúan entre sí, lo cual genera confusiones y problemas de credibilidad respecto de información que circula, tanto en el ámbito técnico, como en el público.

No obstante, la base en la toma de decisiones para establecer las alertas es la información meteorológica disponible para el área bajo protección. En este sentido, las principales variables observadas diariamente son: temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y los días acumulados sin lluvia.

El único desarrollo realizado a la fecha en el país lo constituye el Índice de Riesgo de Incendios Forestales elaborado por el profesor Guillermo Julio en 1990, el cual consta de una fórmula general para el territorio comprendido entre la V y la X regiones, y otros más específicos para 15 zonas de riesgo definidas dentro del mismo territorio (Julio, G., 1990). Lamentablemente, por el escaso apoyo financiero a nuevas investigaciones para consolidar dicho índice, se está produciendo una falta de vigencia, creando con ello la necesidad de que cada programa de protección del país genere metodologías que complementen sus debilidades.

De acuerdo a un estudio realizado en la Universidad de Chile, puede mejorarse en cuanto a la calidad de la información entregada, mediante: aumento del periodo de vigencia, extendiéndolo hacia los meses de octubre y mayo, dependiendo de la dinámica de la ocurrencia durante las últimas 15 temporadas; redefiniendo las zonas de riesgo mediante la interpolación de las variables capturadas a partir de un grupo de estaciones meteorológicas localizadas dentro del área, creando con ello sectores de igual comportamiento para las variables meteorológicas; mejorar el factor estacionalidad mediante estudios para estimar el comportamiento humano, o bien, reproducir la ocurrencia histórica. Además, se debe estudiar la incorporación de nuevas variables (Pedernera y Castillo, 2004).



En términos prácticos, actualmente se emplea este índice agregando la experiencia acumulada por los especialistas en cada Región (metodología utilizada mayoritariamente por CONAF entre la IV y X regiones, con algunas variaciones locales), o bien utilizando tablas con variables adicionales al Índice de Riesgo (empleada en CONAF VIII Región), tales como: nivel de recursos de combate, presencia de eventos sociales masivos, cantidad de incendios que pasan para el día siguiente, presencia de vientos puelches, entre otras, debidamente ponderadas por su influencia en el estado de alerta que requiere la organización. En tanto, en algunas empresas forestales han optado por desarrollar índices complementarios derivados del sistema estadounidense Behave (empleado para pronosticar el comportamiento del fuego), o bien por proyectar sobre un territorio iso-curvas de algunas variables meteorológicas empleando plataforma GIS, según umbrales de decisión (Ramírez de Arellano, C.; Valenzuela, L., 2005).

### **15.2.3. Manejo del riesgo de incendios forestales en la Protección Civil**

De acuerdo a lo establecido en el D.S. 156 del Ministerio del Interior, publicado en el Diario Oficial el 12 de marzo de 2002, la Protección Civil, entendida como la protección a las personas, a sus bienes y ambiente ante una situación de riesgo colectivo, sea éste de origen natural o generado por la actividad humana, es ejercida en la República de Chile por un sistema integrado por organismos, servicios e instituciones, tanto del sector público como del privado, incluyendo a las entidades de carácter voluntario y a la comunidad organizada, bajo la coordinación de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), todo lo cual conforma el Sistema de Protección Civil (Onemi, 2006).

En este sistema, todos mantienen su propia estructura y tienen plena libertad para adecuar su organización, con el objetivo de lograr máxima eficiencia en el cumplimiento de sus tareas de prevención, mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación frente a un evento destructivo, concurriendo cada uno con sus recursos humanos y técnicos especializados, en forma coordinada, según corresponda.

En el caso de incendios forestales de gran magnitud, por su extensión o valores afectados o que amenacen la vida, salud o bienes de las personas o que puedan llegar a constituir una catástrofe por su cercanía a centros poblados u obras públicas, CONAF comunica de inmediato este hecho al Alcalde, Gobernador Provincial o Intendente Regional, según corresponda, quien califica la emergencia, activa los planes de emergencia locales y dispone la movilización urgente de los elementos humanos y materiales destinados a combatir dichos siniestros

Desde un punto de vista de la protección Civil, toda emergencia está asociada a un riesgo, estableciéndose en base a ello un “Ciclo del Manejo del Riesgo”, en la cual el análisis del riesgo específico y consecuentes acciones se aborda metodológicamente a partir de una secuencia cíclica, con etapas relacionadas. Estas etapas son la Prevención, Mitigación, Preparación, Alerta, Respuesta, Rehabilitación y Reconstrucción.



Figura 15.3. Ciclo de manejo del riesgo.

Como se observa en la Figura 15.3, una de las etapas consideradas en el ciclo es la alerta, la que a su vez depende de la evaluación del riesgo. Desde el punto de vista de la protección civil, el riesgo se define como: la probabilidad de exceder un valor específico de daños sociales, ambientales y económicos en un lugar dado y durante un tiempo de exposición determinado. El Riesgo se configura por la relación entre factores de Amenaza y factores de Vulnerabilidad, y son interdependientes y directamente proporcionales.

La Amenaza se concibe como un factor externo de riesgo, representado por la potencial ocurrencia de un suceso de origen natural o generado por la actividad humana, que puede manifestarse en un lugar específico, con una intensidad y duración determinadas. Este concepto se asemeja bastante a la definición de riesgo empleado por los especialistas en manejo del fuego.

La Vulnerabilidad se concibe como un factor interno de riesgo de un sujeto, objeto o sistema expuesto a una amenaza, que corresponde a su disposición intrínseca a ser dañado. Esto se asemeja al peligro en el área de manejo del fuego en el país.

Para la activación de los planes de emergencia se requiere el establecimiento un procedimiento de alerta, la cual se entiende como una señal o sobre-aviso que indica que podría existir, o existe, una situación de emergencia forestal que determina la activación del plan de emergencia denominado ACCEFOR, bajo la coordinación de la autoridad de Gobierno Interior o el Director de Emergencia que lo representa. Esto implica una vigilancia y atención en un territorio determinado, para lo cual se definen los grados de alerta: Verde, Temprana, Amarilla y Roja (Valenzuela, L. 2003; ONEMI, 2006).

Sin embargo, una de las debilidades de la activación de las alarmas es la falta de una metodología válida para calcular los niveles de alerta y en la comunicación de esta información a las autoridades, público y personal técnico. Esta realidad nacional obliga a desarrollar, a muy corto plazo, una metodología que tenga el respaldo científico y emplee todas las tecnologías y conocimiento técnico existente en el país, disponibles por el notable desarrollo alcanzado en comparación a Latinoamérica y Europa, entre otros.

## **15.3. PROPUESTA DE UN SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA**

### **15.3.1. Diseño conceptual**

El concepto de alerta temprana estuvo asociado durante la Guerra Fría al ámbito militar, a través de centros especializados en los que se desarrollaban

sistemas de alerta temprana (SAT) para la prevención de ataques sorpresa del enemigo o de accidentes militares. A mediados de los 80, comenzaron a diseñarse sistemas de alerta temprana de seguridad alimentaria, basados en el análisis de datos socioeconómicos (producción alimentaria, estado nutricional y sanitario, alteración de los precios del grano y del ganado, movimientos migratorios, etc.) a fin de predecir situaciones de aumento de la vulnerabilidad y activar intervenciones políticas para evitar que las sequías u otras catástrofes acaben desencadenando hambrunas (Mojena, E. *et al*, 2002; GFMC, 2004; Proyecto Bolfor, 2001). Actualmente, la ONU se encuentra promoviendo el desarrollo de sistemas de alerta temprana para tsunamis y enfermedades, entre otros (ONU, 2006).

En general, estos sistemas se caracterizan por desarrollar dos fases en su aplicación. La primera corresponde a la captura y análisis de la información en la modalidad de indicadores específicos, según sea la naturaleza del problema que deba enfrentarse, lo que implica que para el control de los incendios forestales se requiere de indicadores basados, principalmente, en parámetros meteorológicos y de comportamiento humano. Una segunda fase tiene lugar cuando la información se transite en forma de algún grado de alerta predeterminada hacia los tomadores de decisiones, sean éstos de carácter público o privados, técnicos o políticos, o bien, dirigido a la comunidad o a los especialistas.

En el ámbito forestal latinoamericano, existen numerosas experiencias en países como Brasil, Bolivia y México, donde se utilizan diversas metodologías. No obstante, la más recurrente es la información satelital, la que para los estándares de eficiencia en Chile no es adecuada, ya que tardan hasta 2 días en procesar la información y entregarla a los usuarios. Sin embargo, puede emplearse en Chile un sistema que combine la información de las diversas estaciones meteorológicas que se están estableciendo en el país, metodologías para calcular índices a partir de dicha información y de otra naturaleza, y la que puede obtenerse desde los satélites para complementar datos faltantes en áreas con baja cobertura de estaciones meteorológicas o para obtener índices de verdor de la vegetación, entre otra información.

Esto implica que diariamente una entidad de procesamiento (Universidad, empresa de servicio u otra), analiza la información capturada de una red de estaciones meteorológicas distribuidas por todo el país (incluyendo la información satelital) y remite los resultados a instituciones como ONEMI, CONAF o empresas forestales u otros usuarios que requieran de dicha información (Compañías de seguros, propietarios medianos y otros) (Figura 15.4). A su vez, estas instituciones u organizaciones distribuyen la información dentro del ámbito de competencia que les corresponde.



Figura 15.4. Diagrama básico de un sistema de alerta temprana de incendios.

### 15.3.2. Características del modelo de pronóstico y la captura de datos

El modelo del sistema de alerta temprana para pronosticar la ocurrencia y comportamiento de incendios forestales que debe desarrollarse para Chile, precisa estar basado en una sucesión de ecuaciones que pueden o no interactuar entre sí. El propósito de este diseño es entregar a la diversidad de usuarios las herramientas adecuadas a sus necesidades. De esta forma, un ciudadano común y corriente necesita de una información de tipo general, en cambio un especialista requiere de mayor diversidad de información para tomar decisiones más asertivas, sean éstas para planificación estratégica,

reprogramar actividades de prevención o generar planes de contingencia para enfrentar exitosamente el control de los incendios, especialmente en condiciones de comportamiento extremo.

El desarrollo exitoso de este modelo implica lo siguiente:

- Establecer un plan de desarrollo que contemple una asociatividad entre las diversas universidades y especialistas disponibles en los ámbitos público y privado, asignando a grupos multidisciplinarios el desarrollo de etapas y productos específicos. El desarrollo del país alcanzado en los inicios del siglo XXI, permite que profesionales ajenos al ámbito forestal puedan aportar sus conocimientos para resolver un problema que afecta a toda la comunidad nacional. En este sentido, es primordial incorporar expertos en manejo del fuego de diversas universidades, así como también profesionales como Ingenieros matemáticos, estadísticos, físicos, antropólogos, sicólogos, programadores de computadoras y muchos otros.
- Utilizar al máximo la información e infraestructura meteorológica, de ocurrencia de incendios forestales y de información técnica disponible en el país.
- Promover la incorporación de nuevas fuentes de información básica (meteorológica y de los combustibles vegetales), completar estudios faltantes y desarrollar productos intermedios para atender las urgentes necesidades de los especialistas en manejo del fuego.
- Incorporar al usuario especializado en la discusión del producto final que requiere, además de interactuar como asesor técnico en el desarrollo de cada una de las etapas del plan de desarrollo.

En relación a los parámetros básicos requeridos para modelar cada uno de los índices o productos del sistema, no sólo es importante disponer de la mayor red posible de fuentes proveedoras de datos (estaciones meteorológicas, satélites, parcelas de estudio) o de su cantidad, sino que también es clave la

calidad de los datos. Esto, porque de nada sirven una base amplia de valores si éstos son inconsistentes, en razón a que no podrá obtenerse resultados que sean confiables en el orden práctico o estadísticamente válido.

### 15.3.3. Indicadores

La experiencia mundial sobre la materia indica que la metodología más empleada para realizar pronósticos del comportamiento de los incendios forestales, se basa en desarrollar lo que se conoce genéricamente como “Sistemas de evaluación del grado de peligro”, de los cuales los modelos más avanzados son los establecidos en Australia, Estados Unidos, Canadá, España y Francia (Arnaldos *et al*, 2004 y Vélez, 2000).

De acuerdo a lo anterior, a los requerimientos técnicos y a la compleja realidad de cada región del país, se requiere que la unidad encargada de capturar y procesar los datos, emplee para ello un modelo que permita obtener los siguientes productos, entre otros:

#### a) Relacionados con el riesgo

- Índice de ignición o riesgo meteorológico.
- Índice de causalidad humana.
- Índice de sequía.
- Periodicidad de la ocurrencia.

#### b) Relacionados con el peligro

- Índice de energía liberada.
- Índice de propagación o velocidad de propagación.
- Índice de Haynes.
- Velocidad y dirección del viento.
- Índice meteorológico del peligro.
- Tipo de incendio esperado.

Esta información resultante debe expresarse en diferentes grados que reflejen

los niveles de manifestación de cada variable y, preferentemente, en mapas digitales contruidos con tecnología SIG, para ser insertados en las bases de datos de las Centrales de Operaciones al momento de tomar decisiones para asignar medios de combate u otras actividades relacionadas con manejo del fuego.

#### 15.3.4. Propuesta de niveles de alerta

La esencia de un sistema de alerta temprana es que las organizaciones de protección público o privados tengan información con antelación mínima de 24 horas e, idealmente, de una semana, con la finalidad de poder disponer del tiempo necesario para actuar frente a la emergencia que podría producirse. En este sentido, definir y declarar un estado de alerta es vital para lograr el propósito anterior, por lo cual y para uniformar los criterios existentes actualmente, se propone una clasificación general de las alertas para uso público-técnico, definida por los colores verde, amarillo y rojo. El verde indica un nivel bajo y el rojo un nivel extremo, independientemente que para cada índice o producto en particular se establezca una escala diferente.

- a) **Alerta azul:** no existen condiciones para que un fuego pueda expandirse, generando con ello un incendio forestal.
- b) **Alerta verde:** bajo o moderado nivel de riesgo o peligro de incendio forestal, lo que implica la ocurrencia de incendio, pero que su potencial de propagación puede ser controlado con los medios de que disponen los Sistemas Básicos de Protección Contra Incendios Forestales de las organizaciones privadas, de la Corporación Nacional Forestal y de otras organizaciones, previéndose que cada incendio registrado en el territorio puede ser controlado dentro de los parámetros razonables de eficiencia y eficacia preestablecidos.
- c) **Alerta amarilla:** representa un riesgo y peligro en un nivel alto. Constituye una parte esencial de la Alerta Temprana, puesto que se prevé un potencial de propagación o simultaneidad de ocurrencia que pueden generar altos



niveles de resistencia al control, debiéndose en estos casos activar medios complementarios para atender posibles emergencias. Estas situaciones factibles de ocurrir son:

- Cuando existe una alta probabilidad que una amenaza, representada por uno o más incendios forestales, puedan generar situaciones de emergencia o daños de magnitud en áreas rurales y suburbanas vulnerables a incendios forestales.
- Cuando existe el potencial que un incendio forestal pueda crecer en extensión y severidad, permitiendo inferir que no podrá ser controlado con los recursos especializados disponibles normalmente en un territorio determinado y que pueda generar amenaza inminente para el medioambiente, la comunidad y sus bienes.
- Cuando se prevé una simultaneidad de incendios forestales, que no podrán ser controlados con los recursos locales normales, y que por lo tanto amenaza la vida, salud, medioambiente, bienes y valores forestales o no forestales importantes de proteger, debiendo alistarse los medios que han sido preparados para actuar en colaboración de medios profesionales responsables de controlar los incendios forestales, sean éstos en áreas públicas o privadas.

**d) Alerta roja:** expresa niveles extremos de riesgo y peligro para la población, bienes productivos y áreas de protección ecológica, entre otros. En términos de conflictividad de los incendios, es factible esperar que se produzcan incendios simultáneos con generación de focos secundarios múltiples o de gran extensión lo que obligue a trabajar durante un largo periodo para lograr su control. Esto implica una movilización de los medios dispuestos para atender emergencias, conforme a las pautas técnicas de cada organización de protección contra incendios forestales.

Otro aspecto fundamental en un sistema de alerta temprana, y en la protección civil, lo constituye que una alerta debe estar enmarcada dentro de una COBERTURA. Es decir, debe indicar el territorio para el cual es válido el nivel de alerta determinado, pudiendo ser una o más comunas, una o más provincias, o una o más regiones, o bien, todo el país e incluso predial si el usuario así lo requiere.

## 15.4. DISCUSIÓN

El desarrollo de un Sistema de Alerta Temprana puede ser desarrollado perfectamente a escala Nacional o Regional, dependiendo del interés que los actores de la protección contra los incendios forestales demuestren en esta tarea, puesto que están disponibles las tecnologías, el conocimiento básico y las líneas de financiamiento para trabajos de esta naturaleza. Sin embargo, cualquier implementación necesariamente debe contemplar a CONAF, las grandes empresas forestales y a las Universidades Chilenas, por lo que un acuerdo entre ellos es de vital importancia para el desarrollo tecnológico que pueda alcanzar el país en los próximos años. Un buen ejemplo de lo exitoso que pueden ser las políticas claras en esta materia lo constituye España, país en el cual se ha logrado, en los últimos 10 años, un importantísimo nivel de desarrollo tecnológico y científico en el área de manejo del fuego, lo cual le permitirá avanzar en los niveles de eficacia y eficiencia en el control de los incendios forestales a corto y mediano plazo.

Otro aspecto importante en el establecimiento del sistema propuesto, radica en separar las funciones de investigación de aquellas de comercialización y distribución de la información, puesto que se ha observado, en situaciones pasadas, que la mezcla de dichas funciones en un sólo actor ha resultado en fracaso, debido principalmente a la altísima especialización de cada una de ellas.

## 15.5. LITERATURA CITADA

Arnoldos, J. *et al.* 2004. Manual de ingeniería básica para prevención y extinción de incendios forestales. Mundi-Prensa. España.

CONAF. 2002. Informes finales estadísticos de temporadas. Programa Manejo del Fuego. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Santiago de Chile.

CONAF. 2003. Informes finales estadísticos de temporadas. Programa Manejo del Fuego. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Santiago de Chile.

Conaf. 2005. Incendios forestales en Chile periodo: 2004-2005, Informe Ejecutivo. Gerencia de Operaciones. Corporación Nacional forestal. Santiago.

Julio, G. 1990. Diseño de Índices de Riesgo de incendios forestales para Chile. Revista Bosques 11(29: 59 – 71. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral. Valdivia.

GFMC. 2004. Estado de la elaboración de la red mundial de incendios forestales a través del establecimiento de redes regionales de incendios forestales. Centro Mundial de Monitoreo de Incendios (GFMC). Alemania.

Mojena L., E. et al. 2002. Determinación de las condiciones de riesgo y monitoreo de los incendios forestales mediante técnicas de percepción remota y observaciones terrestres. IV Conferencia Espacial de las Américas. Colombia.

Onemi. 2006. Plan de protección civil. [www.onemi.cl](http://www.onemi.cl)

ONU. 2006. Onu lanza plan global de sistemas de alerta temprana. <http://www.un.org/spanish/news/fullstorynew.asp?newsIP=38608criterial=tsunami>

Ramírez de Arellano, C., Valenzuela, L. 2005. Aproximación a la situación actual en Chile en el uso de pronósticos de peligro de incendios. XXII Jornadas de evaluación en Manejo del Fuego. Santiago.

Soto, L. 1995. Estadísticas de ocurrencia y daño de incendios forestales temporadas 1964-1995. Corporación Nacional Forestal, Gerencia Técnica. Departamento de Manejo del Fuego. Informe Estadístico N° 44.

Pedernera A., P.; Castillo, M. Vigencia del Índice de Riesgo de incendios forestales. <http://146.83.41.79/profesor/migcast/linfor/index.htm>

Peña, E.; Valenzuela, L. 2004. Incremento de los incendios forestales en bosques naturales y plantaciones forestales en Chile. II Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección contra incendios forestales, Córdoba. España.

Peña, E.; L. Valenzuela. 2005. Daño en las plantaciones de Pinus radiata D. Don y Eucaliptus Globulus Labill, producidos por los incendios forestales. I Seminario Nacional sobre Sanidad e Proteção Florestal, Belo Horizonte. Brasil.

Proyecto BOLFOR. 2001. Sistema de Alerta Temprana de Incendios Forestales (SATIF). <http://mob.conae.gov.ar/redlatif/T198.pdf>.

Valenzuela, L. 2003. Plan de acción, coordinación y comunicación en emergencias forestales (Accefor), para la Región del Bío Bío. Departamento Manejo del Fuego. Corporación Nacional Forestal. Concepción.

Vélez, R. 2000. La defensa contra incendios forestales. Ed. Mc Graw Hill. España.

## CAPÍTULO 16

### **GESTIÓN PARA LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS FORESTALES EN LA VIII REGIÓN DEL BÍO BÍO**

*Autor*

**Eduardo Mera I.**

Ingeniero Forestal  
Jefe Protección del Fuego  
CONAF VIII Región. Chile.  
emera@conaf.cl

Cuando se habla de mejoramiento de la gestión de determinada área de trabajo o Programa, aparecen dos conceptos que, desde algún tiempo, se han vuelto familiares al interior de cualquier organización: la administración del cambio y la reingeniería y/o calidad total, conceptos que al analizarlos se vuelven lógicos a la hora de visualizar acciones que nos permitan ser eficientes en el cumplimiento de objetivos.

Las organizaciones que no son capaces de adaptarse a los cambios influenciados por el desarrollo, o adelantarse a ellos a través de conductas pro activas en un escenario fuertemente competitivo y muy globalizado, tienden a desaparecer. En este tipo de escenario, el cual genera amenazas y oportunidades, los requerimientos y preferencias de los usuarios cambian rápidamente y los cambios políticos, económicos, sociales y culturales son cotidianos, influenciando con ello el quehacer de las organizaciones.

La administración moderna señala, además, que en este escenario la gestión organizacional se debe enfrentar incorporando aspectos de planificación estratégica que puedan garantizar el logro de los objetivos. En este contexto, la planificación estratégica puede enfrentarse a través del modelo definido como calidad total, es decir calidad total de principio a fin en todos los procesos de generación de servicios que realiza la organización, con el propósito de satisfacer la expectativa de los usuarios.

Es aquí donde toman relevancia aspectos relacionados con el trabajo en equipo y gestión participativa, mejoramiento continuo de los procesos, satisfacción garantizada de usuarios, liderazgo efectivo y compromiso activo de todos los miembros de la organización (Figura 16.1).



Figura 16.1. Modelo de gestión para el manejo del fuego.

Sin embargo, uno de los aspectos de este modelo de gestión que tiende a desarrollarse con menor fuerza, dice relación con el trabajo en equipo y el compromiso de los integrantes de la organización en los procesos de mejoramiento continuo. Esto, básicamente ocurre, entre otros aspectos, cuando no existe claridad respecto a los objetivos o resultados que pretenden lograrse.

Es por esta razón que se hace necesario clarificar las funciones del Departamento Manejo del Fuego y contrastarlas con los lineamientos políticos y técnicos y las demandas de la sociedad respecto al servicio de protección contra incendios forestales que ellos esperan, esto con el objetivo de dar un cumplimiento cabal sin descuidar las tareas básicas que, por ley, debe cumplir la institución (Figura 16.2).



Figura 16.2. Compromisos institucionales relacionados con el manejo del fuego.

Si se analizan los compromisos que tiene CONAF y particularmente el Departamento de Manejo del Fuego en el ámbito político e institucional, se observa claramente que se espera una contribución efectiva en los procesos de desarrollo del sector agrícola y forestal, particularmente a nivel de los pequeños y medianos propietarios, considerando las características propias del lugar geográfico o territorio donde viven. Además, se manifiesta claramente que este objetivo se debe lograr a través de la eficiencia en las tareas asignadas, optimizando los recursos públicos, satisfaciendo en forma óptima al usuario y mejorando la imagen Corporativa.

Esta visión de desarrollo y modelo de gestión la debe cumplir el Departamento de Manejo del Fuego dentro del ámbito de sus competencias, las cuales han sido asignadas por ley y que dicen relación con la protección del ecosistema en contra de los incendios forestales.

De acuerdo a ello, CONAF debe abordar la protección a través de acciones básicas que son la prevención, detección, despacho y el combate de incendios forestales, pudiéndose agregar otra que es la recuperación de



las áreas silvestres protegidas del estado afectadas por este tipo de eventos, considerando que la gestión de riesgos a todo nivel debe efectuarse en sus tres etapas ANTES, DURANTE y DESPUÉS.

En este ciclo unidireccional que establece la solución para este tipo de eventos adversos, existe consenso de que la prevención es una de las etapas de mayor importancia en aquellos sucesos provocados mayormente por la actividad humana, fundamentalmente porque a través de ella se reducen los daños y los costos asociados a la respuesta y rehabilitación.

La gestión institucional, por tanto, enfrenta un entorno cada vez más exigente y competitivo, y requiere reforzar el servicio que entrega a la comunidad en términos de eficiencia, eficacia y calidad. Por esta razón, CONAF Región del Bío Bío, en los últimos años, ha impulsado acciones tendientes a mejorar la gestión de Protección contra incendios forestales, considerando como principios rectores la optimización de recursos, la priorización de acciones hacia las áreas de mayor impacto y la focalización del gasto (Figura 16.3).



Figura 16.3. Principios rectores de manejo del fuego.

La estrategia de trabajo se fundamenta en acciones permanentes en el tiempo que permiten continuidad de las actividades preventivas y asociativas que se realizan cada año, formando parte de una orgánica en donde los procesos están articulados unos a otros y, fundamentalmente, en acciones que se gestionan por resultados.

Las herramientas de trabajo son la participación ciudadana, alianzas estratégicas y enfoques multidisciplinarios. En este sentido, uno de los ejes de acción es identificar y vincular nuevos actores en la protección de los recursos naturales y productivos de carácter forestal, especialmente en lo relativo a la prevención y combate de incendios forestales. Estos actores deben provenir de los diferentes ámbitos de la comunidad organizada, tales como juntas de vecinos, agrupaciones de productores forestales, asociaciones gremiales, empresas productivas y de servicios, mundo académico, rompiendo así los compartimientos estancos en los que históricamente se trabajó en las diversas áreas de la institución.

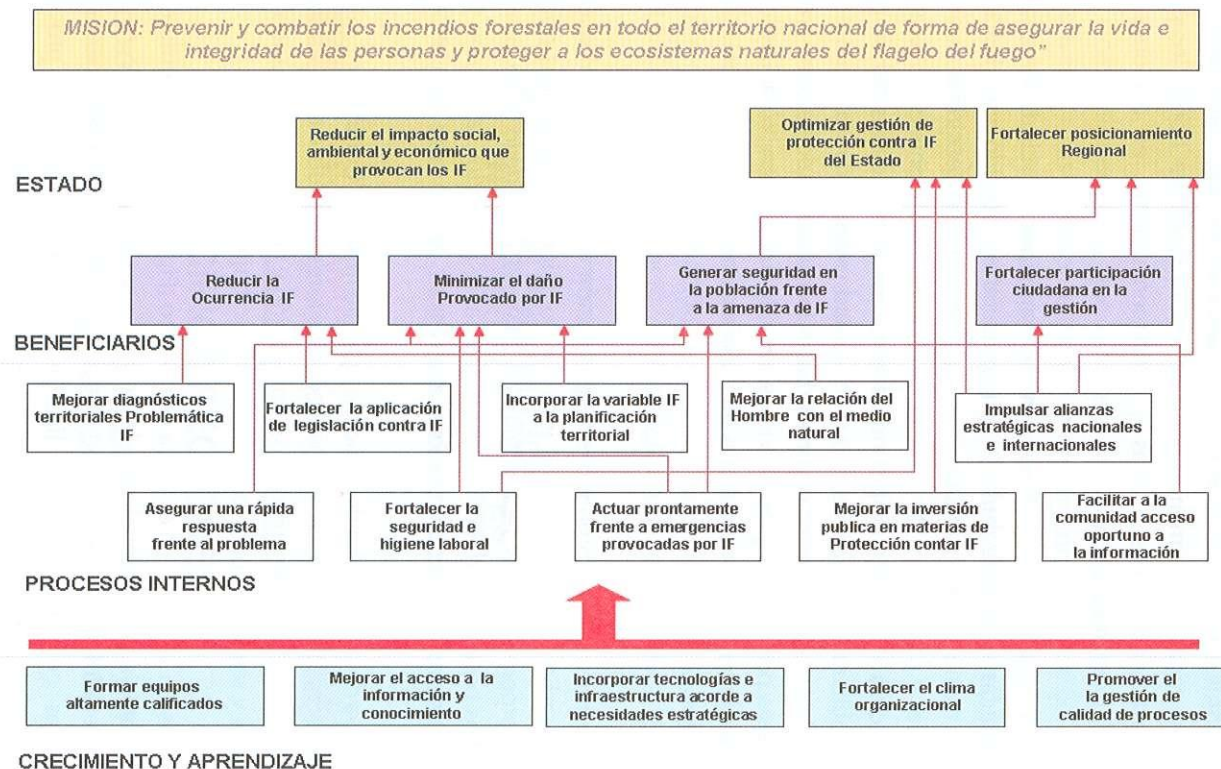
Esto permite que los problemas de protección del sector forestal sean mejor comprendidos y surjan nuevas ideas de soluciones a problemas operativos, se incorporen nuevas tecnologías en Manejo del Fuego y se promuevan estudios básicos en diferentes áreas mediante proyectos, así como también generar sinergias entre los diversos actores.

De acuerdo a ello, se ha definido la siguiente misión: “Contribuir a minimizar la ocurrencia y el impacto de los incendios forestales sobre el medio natural a través de acciones de prevención, mitigación y combate, asegurando calidad de vida y seguridad para la comunidad y trabajadores”.

Esta misión se refleja en el mapa estratégico (Figura 16.4) que permite alinear la estrategia institucional con la gestión para la obtención de resultados. Esta metodología ha permitido traducir la misión en objetivos relacionados, medirlos con indicadores y ligarlos a planes, programas, proyectos a actividades con la consiguiente compromiso de todos los miembros de la Institución.

Figura 16.4.

## Objetivos Estratégicos: Mapa estratégico



Los planes, programas y acciones que contribuyen al cumplimiento de esta misión son los siguientes:

## **16.2. MEJORAR LA RELACIÓN DEL HOMBRE CON EL MEDIO NATURAL**

### **16.2.1. Programa de Educación Ambiental**

Incorpora el conocimiento del ambiente en los objetivos mínimos, obligatorios y transversales que contempla el Ministerio de Educación en los planes de estudio de alumnos de cuarto y quinto año básico.

Mediante este programa se pretende estimular en los niños la adquisición de valores, conocimientos, habilidades y conductas que tiendan hacia la apreciación y el respeto por los recursos naturales presentes en nuestro país, con la firme convicción de que, con su aporte, pueden contribuir significativamente a aminorar los problemas ambientales actuales.

Para la aplicación del señalado programa, se seleccionó como grupo ideal a este segmento del Sistema Educacional, dado que los niños de esta edad pueden reconocer motivaciones basadas en emociones tales como las alegrías, penas, esperanzas y miedos, las que están muy acentuadas a esta edad, permitiéndoles “ponerse en el lugar del otro”, imaginar los sentimientos de otras personas y darse cuenta de los hechos cotidianos que se desarrollan en nuestra sociedad, en especial los relacionados a la problemática ambiental. Por ello, en este nivel educativo es posible explorar causalidades desde el mundo afectivo, desde la empatía.

### **16.2.2. Programa de Certificación de Establecimientos Escolares**

Participación permanente en la Certificación de Establecimientos Educativos de la Región del Bío Bío en conjunto con MINEDUC y CONAMA, de acuerdo al convenio suscrito entre estas instituciones, la Asociación de Municipalidades y la UNESCO, con el propósito de contribuir al mejoramiento de la calidad de la educación, impulsar la educación para la sustentabilidad, generar una cultura ambiental y fortalecer capacidades de gestión local.

A través del Sistema de Certificación Ambiental de Establecimientos Educativos, se establecen estándares ambientales para medir la presencia del componente ambiental en tres ámbitos del quehacer educativo: Pedagógico, Gestión Escolar y Relación con el Entorno.

### **16.2.3. Programa de difusión (Prevención Contingente)**

Tiene como objetivo desarrollar acciones de sensibilización específicas para alertar a público objetivo de alto riesgo en la generación de incendios forestales respecto a sus conductas. Destacan en esta área la difusión radial de frases especialmente diseñadas para públicos objetivos específicos que se emiten por radios comerciales y radios comunitarias; los operativos carreteros cuyo objetivo es informar a los automovilistas del riesgo de incendios forestales del momento y recordarles algunas medidas para evitar que ellos generen estos eventos; los operativos puerta a puerta que tienen como finalidad informar a los habitantes de zonas de interfase de los riesgos presentes en su localidad o población y darles a conocer medidas preventivas en las cuales pueden colaborar; y la brigada abierta que es una actividad que busca posicionar en la ciudadanía la figura del combatiente de incendios forestales a través del conocimiento de su trabajo.

Gran parte de este trabajo de difusión se realiza en conjunto con Empresas Forestales, Carabineros de Chile, Bomberos, CONAF e INDAP.

## **16.3. BUENAS PRÁCTICAS PARA LA ATENCIÓN DE USUARIOS**

### **16.3.1. Programa de Administración del uso del Fuego**

Tiene como finalidad el ordenamiento del uso de fuego para la eliminación de desechos agrícolas y forestales, considerando, como aspectos fundamentales, la reducción de los riesgos asociados a las quemas y el mejoramiento de la atención de los usuarios.

## **16.4. DIAGNÓSTICOS DE RIESGOS A NIVEL TERRITORIAL**

### **16.4.1. Programa de ordenamiento territorial**

Tiene como objetivo diseñar e incorporar normas y medidas en los planes reguladores que permitan evitar daños en asentamientos humanos por efectos de los incendios forestales. En forma paralela se realizan catastros de áreas críticas o vulnerables, con la finalidad de informarlas a la autoridad política responsable. Este trabajo se realiza conjuntamente con el Ministerio de Vivienda y Municipalidades.

### **16.4.2. Determinación de áreas Prioritarias de Protección y áreas homogéneas de prevención**

Tiene como finalidad identificar aquellas áreas o territorios de la Región que requieren una atención prioritaria para acciones de prevención y combate de incendios forestales, considerando variables de riesgo, peligro o daño potencial. Así mismo, es posible identificar áreas que por su causalidad requieren acciones preventivas diferentes.

## **16.5. FORTALECIMIENTO DE LA GESTIÓN TERRITORIAL INTEGRADA**

### **16.5.1. Programa de Participación Ciudadana**

La Participación Ciudadana constituye para la Sección de Prevención una valiosa herramienta integradora de la comunidad en los distintos trabajos de prevención y cuidado del medio ambiente que se aplican en diversos sectores de la Región.

Con esta herramienta, y el apoyo de equipos multidisciplinarios, se diseñan estrategias de trabajo que permiten consolidar en la población una conciencia de riesgo y daño al interior de la comunidad.

Se trabaja con agrupaciones vecinales que presentan vulnerabilidad frente a los incendios forestales a través de metodologías psicosociales de investigación e intervención, que permitan generar un cambio de percepción respecto a su entorno inmediato y, por consiguiente, un cambio en su comportamiento, promoviendo una actitud proactiva con su entorno natural inmediato.

### **16.5.2. Programa de Protección Civil Integrado**

Busca potenciar el accionar de los Comités de Protección Civil en el ámbito Regional, Provincial, Comunal y Vecinal en todas las fases de atención del los eventos adversos (antes, durante y después). Contempla la asesoría a los comités de protección comunal en la elaboración de sus planes de emergencia.

## **16.6. INCREMENTO DE LA ACCIÓN FISCALIZADORA**

### **16.6.1. Programa de Prevención de incendios forestales Intencionales**

Este programa pretende, a través de la acción conjunta de distintas Instituciones, lograr un trabajo coordinado que permita potenciar las acciones que normalmente se desarrollan en cada organización; obtener sanciones ejemplarizadoras y difundirlas; y contribuir con ello a la disminución de los Incendios Forestales Intencionales. Es así como Carabineros de Chile realiza patrullajes preventivos en áreas en donde existe certeza de la existencia de incendios intencionales; el Ministerio Público investiga el delito de incendio; y CONAF y Empresas forestales aportan antecedentes y elementos para la investigación, juicios orales y salidas alternativas.

Este trabajo se materializa mediante el funcionamiento del Comité de Prevención de Incendios Forestales Intencionales, el cual cuenta con la participación del Ministerio Público, Carabineros de Chile, OREMI, Bomberos y Empresas Forestales.

## **16.6.2. Programa de Determinación de Causas**

Mediante la utilización del método denominado “Evidencias Físicas”, se determina la causa de origen de los incendios forestales, con el objetivo de reorientar las actividades del plan de Prevención y apoyar al Ministerio Público en la investigación de delitos.

Este trabajo es liderado por un equipo de 3 profesionales que conforman la BRIDECA (Brigada de determinación de causas). Uno de ellos es el encargado de la prueba material, otro de la prueba personal y el tercero es el coordinador del equipo.

## **16.7. GESTIÓN DE COMPETENCIAS**

### **16.7.1. Programa de Mejoramiento de competencias laborales**

Permite la certificación laboral de los trabajadores del área de protección contra incendios forestales, acreditándolos desde el punto de vista médico, fisiológico, psicológico y técnico. Se trabaja en alianza con el Laboratorio de Ergonomía de la Universidad de Concepción.

## **16.8. SISTEMA BÁSICO DE PROTECCIÓN OPTIMIZADO**

### **16.8.1. Plan de Prevención de Riesgos Laborales y control de Daños y Pérdidas**

Busca aumentar la seguridad en el trabajo y mejorar los ambientes laborales a través del compromiso y participación activa de los niveles directivos, técnicos y operativos en la investigación de accidentes e incidentes, observaciones e inspecciones planeadas y auditorías de seguridad. Se trabaja en alianza con la Mutual de Seguridad.



### **16.8.2. Programa de Detección, Despacho y Combate de Incendios Forestales**

Permite asegurar el control y extinción de los incendios forestales en la Región, bajo estrictos estándares de eficiencia y eficacia. Es así como se ha definido como fundamentos para la determinación de indicadores de gestión, una detección oportuna, un despacho inteligente y un combate seguro y eficiente.

Para optimizar los recursos de combate, se ha privilegiado las alianzas estratégicas con Bomberos, Ejército de Chile, Medianos Propietarios Forestales y Empresas Forestales. El accionar conjunto ha permitido mejorar los procesos de selección de personal, capacitación, coordinación en el combate de incendios y mejoramiento de procedimientos en todos los ámbitos de trabajo.

El procedimiento de trabajo de CONAF en este ámbito y considerando la relación que existe entre el número de incendios, cobertura a proteger y recursos de combate disponible, está basado en prioridades de protección que definen los criterios de despacho de recursos de combate, pudiendo así modificar las fuerzas, combinación y tipo de recursos en el ataque inicial.

Para optimizar la decisión de despacho existen criterios para el envío de recursos aéreos, recursos terrestres y personal técnico.