

# CÁTEDRA DE AGROCLIMATOLOGÍA

## Apuntes Teóricos

### **Autores:**

Rafael Hurtado  
María E. Fernández Long  
Mónica Valdiviezo Corte  
Carla Moreno  
Fabio Alabar  
María del C. Rivera Funes

Antonio Pascale  
Edmundo Damario

---

**2023**

## 1. TIEMPO Y CLIMA

Habitualmente se dice que la agricultura es una fábrica al aire libre donde, más allá de los avances tecnológicos, los rendimientos de los cultivos continúan dependiendo de las condiciones del tiempo. Por esto es de fundamental importancia el estudio de los efectos del **tiempo** y del **clima** sobre la productividad de los sistemas agropecuarios. Cabe entonces hacer una correcta distinción entre estos dos términos que con frecuencia suelen confundirse en la jerga doméstica, pero que en el lenguaje científico poseen significados muy precisos.

El **tiempo meteorológico** es el estado de la atmósfera y su proceso de evolución en un momento y lugar determinado. A veces se lo denomina también “clima actual”.

El **clima**, en cambio, es el estado **medio** de la atmósfera y su proceso **normal** de evolución en un lugar y para una época determinados. La medida usual del clima incluye:

- a) estimación de valores medios (tendencias centrales) de los principales elementos,
- b) estimación de la medida de la variabilidad alrededor de estos valores medios. (En la naturaleza, la variabilidad puede ser estrictamente periódica, cuasi periódica o no periódica.)

La ciencia que estudia el clima es la **climatología** que constituye una rama de la meteorología, basada en la física experimental y en la geografía, pero en la cual el factor geográfico prevalece sobre el factor físico y la **meteorología sinóptica** es la ciencia del tiempo para la cual el factor más importante es la unidad de tiempo.

La climatología reúne información, desde el punto de vista de su repetición periódica, de la totalidad de los fenómenos que ocurren en el curso de muchos años en un lugar determinado, mientras que la meteorología sinóptica estudia el estado momentáneo que existe sobre zonas de gran extensión y observa la propagación de cada uno de estos fenómenos dentro del término de horas, días o meses de un año determinado.

Ambas ramas procuran encontrar, en vista de las múltiples formas de dependencia del hombre con respecto a las condiciones meteorológicas, la aplicación de sus resultados en la práctica: mientras la meteorología tiene como finalidad la previsión del tiempo de cada día y el pronóstico de las tempestades, la climatología proporciona al agricultor, al industrial, al médico, etc., las bases para poder apreciar en un lugar determinado, la influencia de esos fenómenos, de acuerdo con su proceso normal, sobre el desarrollo de los cultivos, sobre las actividades industriales, enfermedades, plagas, etc.

### ELEMENTOS Y FACTORES DEL TIEMPO Y DEL CLIMA

**Elementos:** son el conjunto de variables físicas mediante las cuales se describe el estado actual o medio de la atmósfera. Por ejemplo: temperatura, precipitación, humedad, presión atmosférica, radiación, viento.

**Factores:** son las causas o fenómenos de diversa naturaleza que actúan sobre los procesos atmosféricos modificando la magnitud de los elementos. Pueden ser clasificados en tres grandes tipos: **astronómicos**, **geográficos** y **meteorológicos**.

**Factores astronómicos** son aquellos que provienen de causas externas al planeta:

- Radiación solar.
- Distancia entre la Tierra y el Sol.
- Duración de la iluminación solar.

**Factores geográficos** son aquellos internos al planeta pero que no pertenecen a la atmósfera:

- Latitud.
- Altura sobre el nivel del mar.

- Corrientes marinas.
- Cadenas orográficas etc.

**Factores meteorológicos** son aquellos que pertenecen a la atmósfera:

- Presión atmosférica.
- Viento.
- Humedad.
- Temperatura, etc.

## 2. EL SISTEMA CLIMÁTICO. LA ATMÓSFERA.

El **sistema climático** está constituido por la **atmósfera** (comprende la envoltura gaseosa de la Tierra y sus aerosoles), los **océanos** (comprende el agua salada de todos los océanos del mundo y mares adyacentes), la **criósfera** (comprende el hielo y la nieve sobre la superficie), los **continentes** (comprende las rocas, suelos y sedimentos de ríos y aguas subterráneas) y la **biósfera** (comprende la vida vegetal y animal, incluida la vida humana). Cada una de estas componentes tiene características físicas bastante diferentes y están ligadas entre sí por una variedad muy amplia de procesos físicos.

### 2.1 Composición de la atmósfera

El aire es una mezcla de gases muy compresible, por lo que sus capas inferiores son mucho más densas que las superiores; por ejemplo, la densidad media disminuye desde aproximadamente 1,2 kg/m<sup>3</sup> en la superficie hasta 0,7 kg/m<sup>3</sup> a 5000 m, que es el límite aproximado de habitabilidad humana. Sin embargo, el considerable espesor de la atmósfera es la causa de que ejerza sobre la superficie de la Tierra una presión suficiente para equilibrar una columna de mercurio de 760 mm de altura equivalente a una fuerza de algo más de 1 kg/cm<sup>2</sup>.

Aunque son muchos los gases que componen la atmósfera, cinco de ellos - nitrógeno, oxígeno, argón, dióxido de carbono y vapor de agua - constituyen el 99,97% de su volumen por debajo de los 90 km de altura. El cuadro siguiente presenta la composición de la atmósfera:

Composición volumétrica de la atmósfera húmeda.

Componentes Constantes	% en volumen	Componentes Variables	% en volumen
Nitrógeno	78,08	Dióxido de Carbono	0,034
Oxígeno	20,95	Monóxido de Carbono	0,01
Argón	0,93	Ozono	0,001
Neón	0,0018	Dióxido de Azufre	0,0001
Helio	0,00052	Dióxido de nitrógeno	0,00002
Kriptón	0,00011	Vapor de Agua	0 - 4,0
Hidrógeno	0,00005		
Xenón	0,000008		

Las variaciones en la composición que se observan con la altura están relacionadas con la localización de las fuentes de los dos gases no permanentes más importantes: **el vapor de agua y el ozono**. Puesto que ambos absorben parte de la radiación solar y terrestre, el balance de calor y la distribución vertical de temperatura de

la atmósfera se ven considerablemente afectados por la distribución de estos dos gases. El **vapor de agua** constituye hasta el 4 % en volumen de la atmósfera (el 3 % en peso, aproximadamente) cerca del suelo, pero está casi totalmente ausente por encima de los 10 o 12 km. En cambio el ozono se encuentra concentrado principalmente entre los 15 y los 35 km, en las capas de la atmósfera que reciben la radiación ultravioleta del Sol, originando la rotura de las moléculas de oxígeno que pueden recombinarse con otras moléculas de oxígeno, dando lugar al **ozono**.

Las cantidades de dióxido de carbono y de ozono que contiene la atmósfera pueden variar en el transcurso de un período largo de tiempo; estos cambios tienen especial importancia a causa de su posible efecto sobre el balance calórico del planeta.

El dióxido de carbono, penetra en la atmósfera principalmente por la acción de los organismos vivos de la tierra y el océano. La descomposición de elementos orgánicos del suelo y la quema de combustibles fósiles son fuentes secundarias adicionales. Es evidente que, si esta producción no estuviese compensada de algún modo, la cantidad total de dióxido de carbono existente en la atmósfera aumentaría de una manera continua. Se mantiene un equilibrio dinámico a causa principalmente de la fotosíntesis, que elimina aproximadamente el 3 % de la producción anual total de dióxido de carbono en el mundo. En los océanos, el dióxido de carbono se emplea en la producción de carbonato de calcio, destinado en parte a formar las conchas y esqueletos de los animales marinos. En los continentes, la materia muerta se convierte en humus, que puede transformarse posteriormente en combustible fósil. Los intercambios entre la atmósfera y los otros depósitos están prácticamente equilibrados.

Sin embargo, este equilibrio no es absoluto, ya que se estima que, entre 1900 y 1935, la cantidad total de dióxido de carbono en la atmósfera aumentó en un 9 %, a causa de la creciente utilización de combustibles fósiles. El aumento correspondiente a esta combustión, según los cálculos realizados, debería ser el doble de esta cifra. Los resultados globales están basados en observaciones realizadas principalmente en países industrializados, pero, a pesar de la poca exactitud de estos datos, la discrepancia es lo suficientemente grande como para indicar que uno de los principales depósitos de dióxido de carbono, probablemente el océano, absorbe cerca de la mitad del dióxido de carbono que penetra en la atmósfera, actuando por tanto como un amortiguador de intercambio.

El dióxido de carbono absorbe una gran cantidad de la radiación terrestre que, de otra manera, se perdería en el espacio. Por lo tanto, un exceso de dióxido de carbono haría que la atmósfera almacenara cantidades mayores de la energía que proporciona el Sol aumentando la temperatura global.

## **2.2 Estratificación de la Atmósfera**

La atmósfera puede ser dividida en capas horizontales bastante marcadas, sobre la base de ciertas características que las diferencian nítidamente como, por ejemplo, la temperatura. De modo general, la atmósfera, puede considerarse formada (ver figura 2.1) por tres capas relativamente calientes separadas por dos capas relativamente frías.

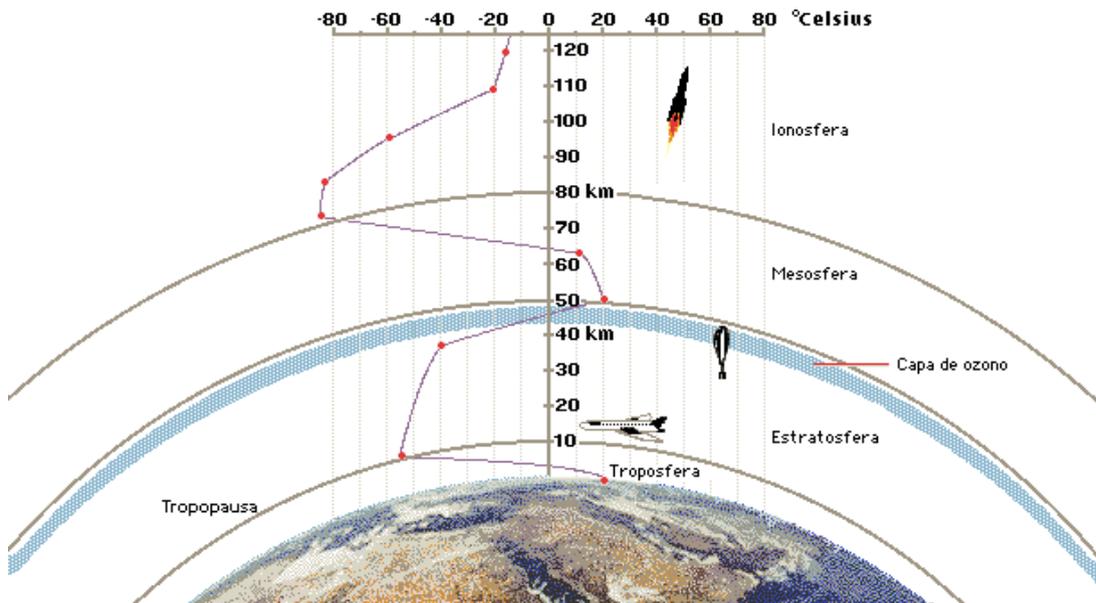


Figura 2.1: distribución vertical de la temperatura, hasta aproximadamente 120 Km.

### Tropósfera

La capa inferior de la atmósfera recibe el nombre de **tropósfera**. Es la zona en que ocurren casi todos los fenómenos del tiempo y donde la turbulencia atmosférica es más marcada. Contiene el 75 % de la masa gaseosa total de la atmósfera y prácticamente todo el vapor de agua y aerosoles.

En general, la temperatura en la tropósfera desciende con la altura a un ritmo medio de unos 6,5 °C/km, y en su límite superior se encuentra una inversión de temperatura (es decir, una capa de aire relativamente más cálido) o bien un estrato isotermo que recibe el nombre de "tropopausa". Por lo tanto es, en gran parte, un sistema cerrado, ya que la inversión actúa como una tapa que limita la convección.

La altura de la tropopausa no es constante variando de unos 14 km en el ecuador a sólo 8 km en los polos.

### Estratósfera

La segunda de las grandes capas atmosféricas es la **estratósfera**, que se extiende desde la tropopausa hasta unos 50 km. de altura y contiene la mayor parte del ozono atmosférico.

La temperatura aumenta con la altura de una manera bastante general, encontrándose el aire más frío en la tropopausa ecuatorial aunque debe mencionarse que existen diversas variaciones un tanto complicadas de explicar. Recientes investigaciones han revelado que existe un régimen de vientos bianual, con vientos del Este en la capa que se extiende entre 18 y 30 km y que duran de 12 a 13 meses, seguido por otro de vientos del Oeste que dura un período semejante de tiempo. Dilucidar hasta que punto los fenómenos que tienen lugar en la estratósfera están relacionados con los cambios de circulación y temperatura en la tropósfera constituye uno de los problemas más importantes de la investigación meteorológica actual.

### Mesósfera

Se extiende desde los 50 a los 80 km. de altura. Por encima de la relativamente cálida estratopausa, las temperaturas descienden hasta alcanzar un mínimo de unos -90 °C en su límite superior.

Esta capa se conoce comúnmente con el nombre de **mesósfera**. Por encima de los 80 km, las temperaturas empiezan a aumentar de nuevo con la altura y esta inversión se designa con el nombre de "mesopausa". Es en esta región, en las altas latitudes, donde se observan las "auroras boreales" durante las noches de veranos. Al parecer, su

presencia se debe a partículas de polvo meteórico que actúan como núcleos para la formación de cristales de hielo cuando pequeñas cantidades de vapor de agua son arrastradas hacia arriba por la convección a alto nivel.

La presión es muy baja en esta capa y desciende de aproximadamente 1 hPa a 50 km hasta 0.01 hPa a 90 km.

### **Termósfera**

La **termósfera** está compuesta principalmente de nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno tanto molecular (O<sub>2</sub>) como atómico (O) aumentando con la altura la proporción de este último.

Las temperaturas aumentan con la altura a causa de la absorción de radiación ultravioleta por el oxígeno atómico y es probable que se acerquen a 1200 °K a 350 km.

Por encima de los 100 km, la atmósfera se ve afectada progresivamente por rayos X y radiación ultravioleta procedentes del Sol, que causan ionización al arrancar electrones cargados negativamente de los átomos de oxígeno y moléculas de nitrógeno.

### **Exósfera y magnetósfera**

La base de la exósfera se encuentra entre unos 500 y 750 km. En ella dejan de cumplirse las leyes de los gases y la tenue atmósfera esta formada por átomos de oxígeno, hidrógeno y helio (de los cuales aproximadamente un 1 % están ionizados).

La frecuencia de partículas ionizadas va aumentando a través de la exósfera y más allá de los 2000 km, en la magnetósfera, sólo hay electrones (cargados negativamente) y protones (cargados positivamente). Estas partículas cargadas están concentradas en dos zonas, a 4000 y 20000 km aproximadamente (conocidas con el nombre de cinturones de "radiación " de Van Allen).

### **BIBLIOGRAFÍA**

R.G. Barry y R. J. Chorley, 1972. Atmósfera, tiempo y clima. Ediciones Omega. Barcelona, España pag 17 a 27 y 62 a 67

CELEMIN, Alberto H. Meteorología Práctica. 1984. Edición del autor. Mar del Plata.

LANDSBERG, H. 1969. Physical climatology. 3r. ed. Gray Printing Company, inc. 446 pp.

MILLER, Albert. Meteorología. 1977. Editorial Labor. Barcelona

### 3. LA OBSERVACIÓN METEOROLÓGICA

La observación meteorológica ha existido desde que la humanidad, sufriendo y gozando de las condiciones meteorológicas, comienza a interesarse por recolectar información de las características del tiempo y principalmente de los fenómenos meteorológicos excepcionales.

En la Edad Media es cuando se comenzaron las observaciones meteorológicas con instrumentos rudimentarios y se crearon sencillos sistemas de observación. Luego, a mediados del siglo XIX, el incremento de la navegación como consecuencia del transporte comercial en todo el mundo provocó el interés en que las observaciones meteorológicas se hicieran mediante un sistema coordinado pues “el tiempo no tiene fronteras”. Así, se comenzó a tratar de normalizar las observaciones y darles regularidad para hacer posible la confección de mapas que representaran un panorama general de la situación reinante. De esta manera se creó en 1873 la Organización Meteorológica Internacional (OMI) que durante muchos años tuvo a su cargo la elaboración de procedimientos detallados para realizar las observaciones y establecer redes de observación seguras y que respondan a lo estipulado por dicha organización. Luego de la Segunda Guerra Mundial, la OMI se reorganizó denominándose **Organización Meteorológica Mundial (OMM)** pasando a ser un organismo especializado de las Naciones Unidas encargado de establecer los procedimientos y prácticas a seguir. Casi todos los países del mundo a través de sus servicios meteorológicos se encuentran agrupados en esta entidad. En nuestro país el **Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** es el organismo responsable de la aplicación de las normas establecidas por la OMM. Actualmente las observaciones meteorológicas se realizan desde las regiones tropicales hasta las polares, en forma regular, de día y noche, durante los 365 días del año.

La observación meteorológica consiste en la medición y determinación de todos los elementos meteorológicos en un momento dado y en un determinado lugar, utilizando instrumental adecuado y complementado por la observación de los sentidos, principalmente la vista. Estas observaciones deben ser realizadas con **métodos preestablecidos** y en forma **sistemática, uniforme, ininterrumpida y a horas establecidas**.

**Las observaciones deben hacerse invariablemente en las horas indicadas y su ejecución en el menor tiempo posible** para que los datos puedan ser comparables con los observados en otros lugares.

Los horarios de observación especificados por la OMM son los correspondientes a la hora del Meridiano 0° ó de Greenwich (hora Z o UTC) y corresponden a las 0, 6, 12 y 18 horas, es decir que para Argentina deben restarse 2 ó 3 horas dependiendo del huso horario en que se encuentre nuestro país según la época del año (Meridiano 30° ó 45°), actualmente, 21, 3, 9 y 15 horas respectivamente. Diariamente, dependiendo de la finalidad de la estación meteorológica, las observaciones pueden hacerse en forma horaria, cada 3, 4 o 6 horas y en algunos casos especiales una sola vez al día.

#### 3.1 Estaciones meteorológicas

Una estación meteorológica es un recinto en el cual existen instrumentos específicos para la medición de los distintos elementos meteorológicos. El instrumental con el que está equipada una estación depende de los fines para los cuáles fue instalada.

Según su finalidad, las estaciones meteorológicas se clasifican en:

<b>SINOPTICAS:</b> Son aquellas en las cuales se obtienen datos meteorológicos horarios que son remitidos <b>inmediatamente</b> a la Central de Pronósticos. Permiten conocer el estado del tiempo en un momento determinado, su evolución y realizar el pronóstico del tiempo.
---

**CLIMATOLOGICAS:** En estas se obtienen datos meteorológicos con una consistencia, homogeneidad y duración tales, que constituyen la información básica para confeccionar estadísticas que permitan describir el clima de una región y explicar sus peculiaridades y funcionamiento.

**AGROMETEOROLOGICAS:** Son estaciones que proporcionan además de los datos meteorológicos que se observan en las anteriores, otro tipo de información tal como: Temperatura y humedad del aire a diversos niveles de la capa adyacente al suelo, temperatura y humedad del suelo a distintas profundidades, evaporación e información biológica y de incidencia de adversidades etc de utilidad en la determinación de los efectos del tiempo y del clima sobre los procesos productivos agropecuarios.

**AERONAUTICAS:** Están destinadas a efectuar observaciones y dar información sobre el estado del tiempo, su comportamiento y evolución como servicio para la seguridad de la aeronavegación.

**ESPECIALES:** Se establecen para obtener observaciones de uno o varios elementos o determinados fenómenos para algún estudio en particular.

### 3.2 Distribución del instrumental y características de los mismos

El instrumental meteorológico debe guardar determinada ubicación dentro de la estación meteorológica (Figura 1). Es importante que se halle correctamente instalado de acuerdo a las especificaciones establecidas por la OMM, y que no exista interferencia entre los instrumentos ni con la vegetación o edificación.

En las estaciones meteorológicas encontramos la **oficina meteorológica** y el **campo de observaciones**, dentro del cual se ubica el instrumental que se instala al aire libre y la **casilla o abrigo meteorológico**, de madera pintada de blanco para reflejar los rayos solares, aireada en forma natural mediante listones de madera puestos a manera de **doble persiana** que permiten la circulación del aire dentro del mismo. Su función es impedir la incidencia de los distintos flujos de radiación sobre los instrumentos que deben medir sólo las características físicas del aire. Su altura es tal que el instrumental colocado en su interior se encuentra a 1,5m del suelo, tal como lo establecen las normas internacionales. (Figura 2)

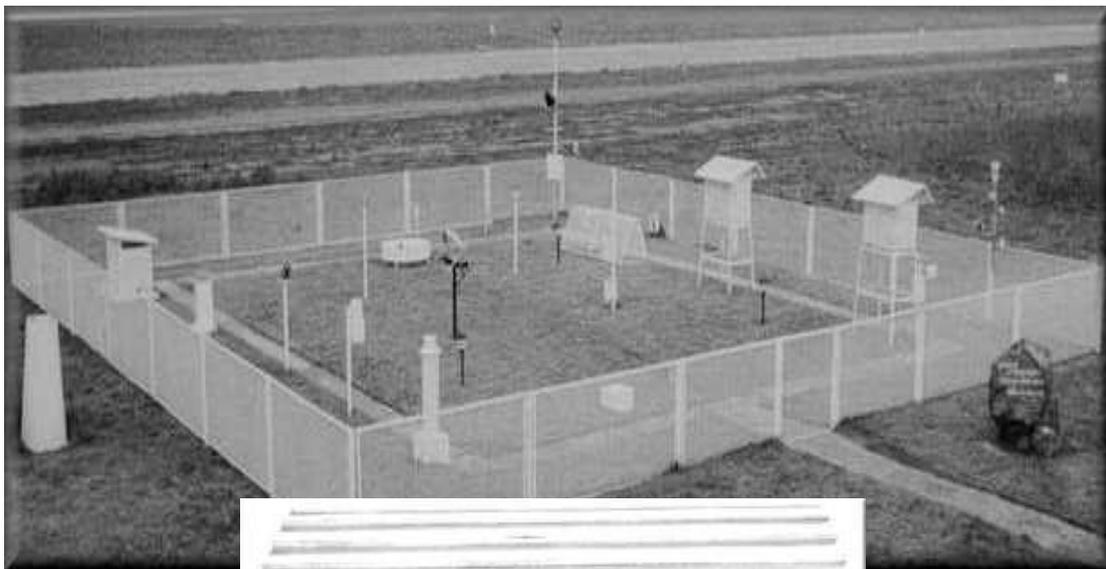


Figura 2: Abrigo meteorológico

### 3.2.1 Instrumental ubicado dentro del abrigo o casilla meteorológica

**Termómetro de máxima:** Se emplea para conocer la temperatura más alta de cada día. Es un termómetro de mercurio. La particularidad de este termómetro es un estrangulamiento que posee en el tubo capilar cerca del depósito; cuando la temperatura aumenta, el mercurio del depósito se dilata con fuerza y puede pasar a través del estrangulamiento, pero al disminuir el mercurio se contrae y en la parte estrecha la columna de mercurio se corta. Al no existir ninguna fuerza que lo obligue a volver al depósito permanece en el tubo capilar marcando la temperatura más alta que alcanzó. Es similar al termómetro clínico que se utiliza para tomar la temperatura corporal aunque de mayor tamaño (Figura 3).

Luego de cada observación, el termómetro debe ponerse a punto sacudiéndolo enérgicamente para que el mercurio regrese al depósito. Su ubicación dentro de la casilla meteorológica es en posición casi horizontal (con el bulbo ligeramente elevado).

**Termómetro de mínima:** Se emplea para conocer la temperatura más baja de cada día. Es un termómetro de alcohol con un capilar ancho por donde se desplaza un índice de plástico, marfil o metal que se encuentra sumergido en el alcohol (Figura 3). Este termómetro se coloca en posición casi horizontal (con el bulbo ligeramente hacia abajo); cuando la temperatura disminuye y el alcohol se contrae, el índice es arrastrado hacia abajo ya que, por su escaso peso, no puede vencer la tensión superficial del menisco que se forma en la extremidad de la columna. Si la temperatura aumenta, el alcohol se dilata sin desplazar al índice. De esta manera, la posición del índice, más alejada del bulbo, nos indica la temperatura más baja alcanzada.

Una vez terminada la medición es necesario poner a punto el termómetro, lo que se logra inclinando el termómetro con el bulbo hacia arriba para que el índice se desplace hasta quedar nuevamente en contacto con el menisco.

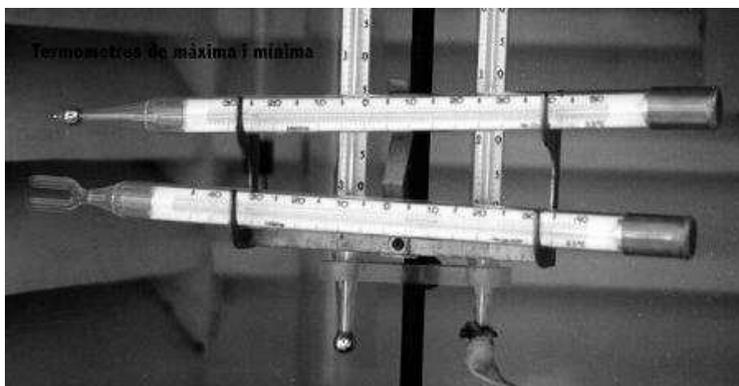


Figura 3: Termómetros de máxima y de mínima

Psicrómetro

Figura 4:

**Par psicrométrico o Psicrómetro:** Este instrumento indica la humedad del aire mediante la comparación de las temperaturas registradas simultáneamente por dos termómetros comunes de mercurio, ubicados verticalmente, uno de los cuales (termómetro de bulbo húmedo o termómetro húmedo) tiene el bulbo recubierto por una muselina (tela) constantemente humedecida con agua destilada. (Figura 4)

El principio en que se basa la medición es el siguiente: si al par psicrométrico se lo coloca en un ambiente saturado de humedad, ambos termómetros marcarán la misma temperatura pues en estas condiciones no se produce evaporación de la película de agua contenida en la muselina. Si en cambio se lo coloca en un ambiente no saturado, se producirá evaporación tanto más intensa cuanto más seco esté el aire. Para que se produzca este cambio de estado es necesario que el agua absorba calor ( $600 \text{ cal g}^{-1}$ ) lo que produce un descenso en la temperatura del termómetro húmedo mientras que el otro (termómetro seco) indica la temperatura actual del aire. Por lo tanto, la diferencia de temperatura entre ambos termómetros (diferencia psicrométrica) es proporcional a la humedad atmosférica. Mediante el uso de la fórmula psicrométrica o de tablas, se obtendrá la humedad relativa, la tensión de vapor actual y la temperatura de rocío, todos estos, elementos que expresan del grado de humedad del ambiente.

**Termohigrógrafo:** Es un instrumento graficador que registra continuamente la temperatura y humedad relativa del aire. El elemento sensible para medir la temperatura es una lámina bimetálica formada por dos láminas de metales con coeficiente de dilatación muy distintos soldadas una con otra a lo largo de toda su longitud. Las láminas están inicialmente en espiral y cuando la temperatura aumenta, la espiral tiende a desenrollarse. Este movimiento es amplificado por un sistema de palancas sujetas en el extremo libre de la espiral que termina en una aguja registradora. El elemento sensible para medir la humedad relativa es un haz de cabellos humano limpios y desengrasados. Cuando existe humedad en el ambiente, este haz sufre un aumento en su longitud y diámetro. Esta elongación se traduce mediante un juego de palancas a una faja de papel graduada de 0 a 100% que también posee en su parte inferior la escala en  $^{\circ}\text{C}$  para registrar la temperatura.

### 3.2.2 Instrumental ubicado dentro de la oficina meteorológica

**Barómetro:** Es el instrumento utilizado para medir la presión atmosférica basado en la experiencia de Torricelli. Se usa mercurio porque es el líquido de mayor peso específico con lo cual es necesario una columna más corta para equilibrar el peso de la columna de aire.

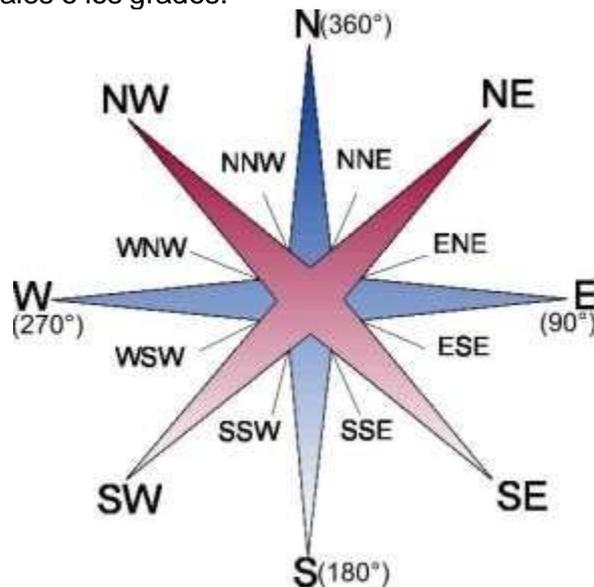
**Barógrafo:** Este instrumento es un barómetro registrador que proporciona un diagrama continuo (graduado en hPa o mm de mercurio) de la presión atmosférica en determinado lapso. El elemento sensible está constituido por una serie de cápsulas aneroides colocadas una a continuación de la otra. La cápsula aneroides es una cápsula metálica flexible, cerrada de manera hermética dentro de la cual se hace vacío y se coloca un resorte que mantiene las caras separadas. Si la presión atmosférica aumenta, la cara de la cápsula cede y comprime el resorte y, si la presión disminuye, la elasticidad del resorte provoca que la caja se expanda. Estas cápsulas se colocan

apiladas de manera que sus deformaciones se sumen y un sistema de palancas unido a una aguja registre las variaciones de la presión atmosférica por más pequeña que éstas sean.

### 3.2.3 Instrumental ubicado en el campo de observaciones

#### Instrumentos destinados a medir dirección e intensidad de viento

La dirección del viento se indica por el punto cardinal desde donde proviene. Se expresa en grados o rumbo geográfico contados a partir del Norte geográfico en el sentido de las agujas del reloj. Se anota la dirección en 16 rumbos colocando las iniciales de los puntos cardinales o los grados.



Para estimar la velocidad del viento la observación puede realizarse visualmente como por ejemplo fijándose en el humo, movimiento de la copa de los árboles, etc .

La velocidad o intensidad del viento es la distancia recorrida por una partícula de aire en la unidad de tiempo y se mide en m/s, km/h o nudos (millas/hora).

**Anemómetro o veleta pendular:** Es una veleta colocada a 10 m de altura aproximadamente, libre de la influencia de árboles, edificios, etc que se compone de una flecha, montada sobre un vástago que le permite girar libremente, cuya cola es más grande que la punta, lo cual determina que por la acción del viento la punta de la flecha marque siempre hacia la dirección del mismo. Al eje vertical va unido un collar con cuatro brazos, formando entre sí ángulos de 90°, que llevan en sus extremos las letras de los cuatro puntos cardinales (rosa de los vientos) a los que están orientados. Para la medición de la velocidad posee una lámina que es movida por el viento sobre una escala que indica su velocidad en un instante determinado (Figura 3.11). La escala utilizada en estos instrumentos es la Beaufort que clasifica los efectos del viento relacionándolos con números de una escala.

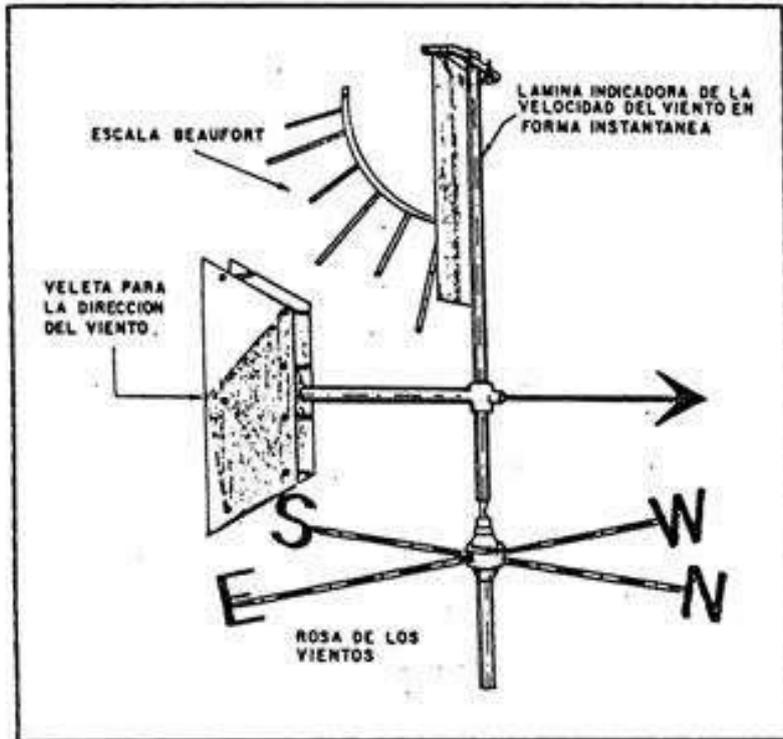


Figura 3.11 Anemómetro o veleta pendular



Figura 5: Anemómetro

**Anemómetro totalizador de cazoletas:** Este instrumento, colocado a 10 m de altura, se compone de tres o cuatro brazos horizontales conteniendo cada uno en su extremo una esfera semihueca o cazoleta, que se hallan fijos a un eje vertical. Dado que la presión del viento sobre la parte cóncava y convexa de las cazoletas es distinta se origina un movimiento giratorio, que, mediante un sistema de engranajes, es registrado en km/h o m/s por un contador de vueltas o dispositivo eléctrico ubicado en la oficina meteorológica (Figura 5). La dirección también es registrada por una veleta, pero no es

necesario salir a observar porque su movimiento se traduce en un aparato con una rosa de los vientos y una aguja que marca la dirección, también ubicado en la oficina meteorológica.

**Anemógrafo:** Es un instrumento graficador que obtiene las variaciones en el tiempo de la velocidad y dirección de viento. Está constituido por un anemómetro de cazoletas para la velocidad y una veleta para la dirección y, mediante un sistema eléctrico, las variaciones son registradas en una faja de papel. Se lo instala a 10 m de altura sin interferencia de obstáculos de toda índole.

### ***Instrumentos destinados a medir precipitación***

**Pluviómetro:** Este instrumento se utiliza para medir la cantidad de precipitación en mm. Está formado por dos partes:

a) Cilindro metálico receptor: Tiene una longitud de 45.5cm y un diámetro de 17.6cm. La parte superior termina en una boca receptora (similar a un embudo) con un diámetro de 15.95cm, lo cual da como resultado una superficie receptora de 200cm<sup>2</sup>. Es de chapa galvanizada y zinc y en su parte superior presenta un aro de bronce que delimita con exactitud la boca receptora (Figura 6).

b) Probeta graduada: La graduación está en milímetros y décimos de milímetros de precipitación. Su diámetro guarda relación con el diámetro de la boca receptora siendo en general 10 veces menor lo que permite amplificar la altura del agua para facilitar la lectura. De esta manera, cada pluviómetro debe venir con su

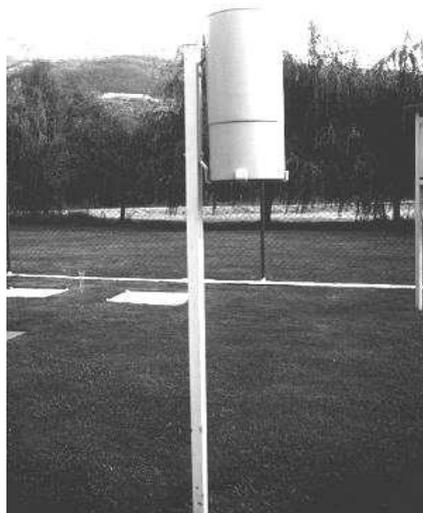


Figura 6: Pluviómetro

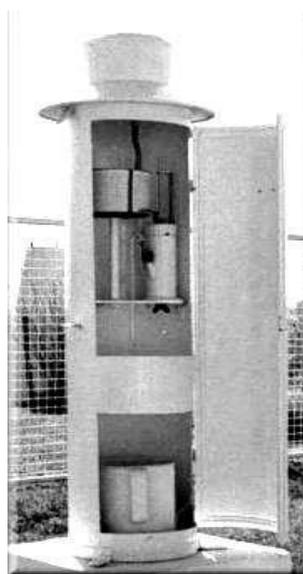


Figura 7: Pluviógrafo

correspondiente probeta. Para medir la precipitación caída se vacía el agua acumulada en el colector en la probeta graduada y se hace la lectura.

La boca receptora deberá ubicarse a 1.50m de altura en posición perfectamente horizontal. Se instalará en un lugar despejado y lejos de obstáculos y debe cuidarse que el interior del mismo esté limpio de hojas, tierra y otros objetos que puedan alterar la medición.

**Pluviógrafo:** Es un aparato registrador que mide la cantidad de precipitación por día e indica la intensidad (mm/min o mm/h) de caída.

Existen dos tipos, el de flotador y el de cangilones, del cual se describirá el primero:

A sifón: el agua recolectada por el pluviógrafo se dirige a un recipiente dotado de un flotador el cual está sólidamente unido a una pluma inscriptora que actúa sobre una

gráfica de papel, diaria, graduada de 0 a 10mm (Figura 7). Al alcanzar el recipiente el valor 10mm, se vacía automáticamente por medio de un sifón y la pluma inscriptora vuelve a cero sobre la gráfica, dejando una línea vertical que indica este hecho. Si la precipitación continúa, el flotador comenzará a funcionar de nuevo y con ello la pluma inscriptora comenzará a marcar otra vez. De esta forma se van dejando trazos en zigzag.

**Nivómetro:** Se utilizan en las zonas donde las nevadas son frecuentes y copiosas durante el invierno. Se mide el equivalente en agua (mm) de la nieve recogida en el nivómetro. Son similares a los pluviómetros excepto por el embudo receptor que posee mayor diámetro y un protector para que el viento no succione los copos de nieve que están en el embudo. Además, poseen un dispositivo interno en forma de cruz, destinado a evitar que los remolinos de aire tengan acción directa sobre el interior del aparato. En lugares remotos, donde es muy difícil llegar en invierno para efectuar la medición, se usan los nivómetros totalizadores que proveen información de la nieve caída en un período largo.

### **Instrumentos para medir distintas formas de radiación**

**Heliofanógrafo:** Este instrumento registrador mide la cantidad de horas que el sol brilla sobre el horizonte sin interferencia de nubes o HELIOFANIA EFECTIVA.. Para poder registrar la insolación este instrumento posee una esfera de vidrio que concentra los rayos solares (como una lupa) sobre una banda de cartulina especial que se quema en el punto donde se forma la imagen del sol. La banda se coloca en el soporte curvo concéntrico con la esfera en forma apropiada. Si el sol brilló en forma intermitente por efecto de las nubes, la traza de papel quemado será discontinua. Cabe destacar que el soporte curvo posee tres ranuras para poder poner tres tipos de bandas diferentes: una para el verano (más larga), una para el invierno (más corta) y una para el otoño y primavera (intermedias). La heliofanía efectiva total diaria se obtiene sumando la longitud de la traza **no quemada**.

Su instalación debe ser en un sitio ubicado a 1.50m de altura, libre de todo obstáculo que impida la captación de los rayos solares. El eje de la esfera debe estar orientado en la dirección Norte-Sur y debe graduarse con la latitud del lugar. Comúnmente se los encuentra en todas las estaciones sinópticas, climáticas y agrometeorológicas.

**Piranómetro/grafó:** Este aparato mide la radiación global (radiación solar directa + radiación difusa) sobre una superficie receptora horizontal. El elemento sensible está formado por tres láminas bimetálicas paralelas entre sí, las del exterior pintadas de blanco y la del interior de negro. La diferencia de temperaturas entre las láminas es transmitida por medio de un juego de palancas articuladas al mecanismo registrador que funciona con un sistema de relojería. El elemento sensible está protegido por una cubierta de vidrio o cuarzo. Esta cubierta no sólo lo protege del viento y la lluvia sino que deja pasar solamente la radiación de onda corta. Si sólo se quiere medir la radiación difusa se emplea el mismo instrumento pero con un anillo sombreador que evita que la luz directa llegue al piranómetro.

Debe instalarse a 1.50m de altura y lejos de paredes u objetos de colores claros que reflejen la luz solar sobre el receptor.

En **estaciones agrometeorológicas** también se encuentran en el campo de observaciones:

**Geotermómetros:** Son termómetros con los cuales se hace la medición de la temperatura del suelo. Se basan en el mismo principio que los termómetros comunes y se diferencian de éstos en la longitud variable de su capilar y que en lugar de ser rectos, están acodados, formando un ángulo de 30° con la vertical para facilitar la lectura (Figura

8). Las observaciones de temperatura del suelo se hacen a las siguientes profundidades: 5, 10, 15, 30, 50 y 100cm.

**Tanque de evaporación:** Este aparato que mide cantidad de agua evaporada por día consta de un depósito cilíndrico de lámina de hierro galvanizado o acero inoxidable apoyado sobre una plataforma de madera (Figura 9). Posee un cilindro de reposo para conseguir que una parte de la superficie permanezca en completa quietud y permita medir con precisión su nivel. Para poder tomar la lectura posee un



Figura 8: Geotermómetro



Figura 9: Tanque de evaporación

micrómetro formado por un tornillo terminado en punta fina, cuya cabeza es un disco graduado. Posee tres brazos radiales que se apoyan en la boca del cilindro de reposo y se hace avanzar el tornillo hasta que la punta toque la superficie del agua. Además, se coloca un anemómetro a la altura del tanque y dos termómetros, uno a la altura de la superficie del agua y el otro sumergido, con el fin de conocer las condiciones ambientales reinantes durante la evaporación.

### 3. 3 Información meteorológica y climática para el agro

La generación y difusión de información meteorológica y climática para el agro comprende una serie de etapas:

- ◆ Observación Meteorológica.
- ◆ Procesamiento de datos y elaboración de productos.
- ◆ Difusión de productos.

Es muy importante que el usuario conozca la forma efectiva de acceder a los productos que difunden los distintos organismos oficiales y privados. Es decir, tiene que saber las vías de acceso a la información disponible y debe, por consiguiente, tener una clara noción de las aplicaciones que cada producto meteorológico y climático puede tener dentro de la actividad agraria.

#### 3.3.1 Observación meteorológica

La observación meteorológica es la herramienta básica para el conocimiento del tiempo y del clima. Sin ella, todo trabajo en el tema no cuenta con la información real y por lo tanto se hace imposible su estudio.

Los observadores meteorológicos requieren de un entrenamiento previo, según normas internacionales impuestas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), familiarizándose con el instrumental y las pautas establecidas para realizar la observación. Los observadores deben codificar la información para su posterior envío hacia los centros regionales de recolección y reenvío de datos. Luego este centro regional es el encargado de reenviar la información recibida de todas las estaciones de su área hacia la sede central del Servicio Meteorológico.

### 3.3.2 Procesamiento de la información

En Argentina los datos provenientes de la observación son recibidos por el Departamento Comunicaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y luego enviados al Departamento de Procesos Automatizados para su decodificación, control de calidad y consistencia, en la cual considera la interrelación entre las variables ambientales para determinar su coherencia. Por ejemplo: si el observador envía una cierta cantidad de precipitación, debe existir también información de nubosidad; si hay niebla, la visibilidad debe ser reducida, etc. Cumplidos los distintos pasos, los datos son almacenados en la Base Nacional de Datos Meteorológicos y Ambientales quedando a disposición de los distintos departamentos de la entidad. El tiempo de todo este proceso (desde que el observador realiza la tarea hasta que es almacenado en la Base de Datos) es de aproximadamente 20 minutos.

Además, se recepciona información de datos de superficie y altura, para nuestro país y de los países limítrofes así como de satélites y de modelos numéricos de predicción del tiempo confeccionados por los servicios meteorológicos de Estados Unidos y del Centro Europeo.

El SMN corre, cada 12 horas, tres modelos de pronóstico numérico del tiempo enfocados a nuestra región, uno de ellos con 36 horas de validez y los otros dos, de mayor resolución, con validez a 96 horas (4 días de pronóstico).

Recopilando toda esta información, el Departamento de Pronóstico del SMN estudia y analiza la situación meteorológica actual y confecciona el pronóstico para el día y días subsiguientes para todo el país.

### 3.3.3 Difusión de la información - productos

Una vez efectuada la predicción del tiempo para todo el país se confeccionan productos para distintos fines tendientes a "difundir" esta información a usuarios internos y externos tales como meteorólogos, ingenieros, ingenieros agrónomos y público en general. Además del pronóstico del día y subsiguientes, es posible acceder a mapas de temperaturas mínima, máxima y precipitación diarias, fotos de satélite, índice de riesgo de incendios, etc. a través de diferentes **fuentes** como publicaciones, boletines radiales y televisivos y páginas web.

A continuación se mencionan las principales **fuentes de información** nacionales y extranjeras y se enumeran sus principales productos.

#### a) NACIONALES

- SMN: [www.meteofa.mil.ar](http://www.meteofa.mil.ar) en la cual se obtienen productos tales como: fotos de satélites, información de meteorología aeronáutica, agrometeorológica, gráficos de temperatura y precipitación media para distintas localidades del país, pronóstico del tiempo para el día y días subsiguientes para todo el país, alertas, pronósticos para la navegación y altura de ríos, datos de cantidad de ozono, mapas de precipitación y de temperaturas extremas diarias, etc. Si la información que se

necesita es específica para un estudio en particular los distintos usuarios (particulares, empresas, organismos oficiales, etc.) pueden dirigirse al Centro de Información Meteorológica (CIM) cuya dirección electrónica es [Cim@meteofa.mil.ar](mailto:Cim@meteofa.mil.ar) y que funciona dentro del SMN.

- INTA: [www.inta.gov.ar](http://www.inta.gov.ar). Dentro de esta página en el Instituto del Clima y Agua se puede encontrar información: agroclimática, agropecuaria, agrometeorológica, pronóstico del tiempo, suma de temperaturas, heladas, inundaciones e incendios forestales, balance de agua, entre otras.
- CONAE: [www.conae.gov.ar](http://www.conae.gov.ar). Dentro de esta página en Emergencias Ambientales se puede obtener información sobre temas de actualidad como por ejemplo: monitoreo de incendios, eventos Niño - Niña, inundaciones e informes del uso de información espacial para la gestión de emergencias.
- BOLSA DE CEREALES: [www.bolcereales.com.ar](http://www.bolcereales.com.ar). Dentro de la misma además de datos tales como los de producción de cereales, se encuentran también informes climáticos elaborados por distintas fuentes.

#### b) INTERNACIONALES

- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov). Dentro de esta página se encuentra: Sitios del tiempo seleccionando el país y una localidad determinada, condiciones actuales y datos, gráficos y productos meteorológicos y climáticos específicos para distintos fines los cuales se pueden obtener a través del FTP (programa de transferencia de archivos).
- USDA (United States Department of Agriculture): [www.usda.gov/news](http://www.usda.gov/news). Con información de sitios como la FAO, donde aparece información agrícola internacional como por ejemplo datos de producción.
- ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecasts): [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int). Con las salidas de las distintas variables meteorológicas para cualquier región del mundo del modelo determinístico atmosférico.

Para la obtención de datos climáticos de nuestro país, se puede recurrir a las **ESTADÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS**, donde están publicados los promedios mensuales surgidos de series de 10 años o las **NORMALES CLIMATOLÓGICAS** en las que los promedios mensuales surgen de series de 30 años. Estas se encuentran en la biblioteca del SMN y en otras de distintos organismos oficiales como la Facultad de Agronomía. Las Estadísticas Climatológicas publicada hasta la fecha corresponden a las décadas 1941-50; 1951-60; 1961-70; 1971-80 y 1981-90, no habiéndose publicado todavía la correspondiente a 1991-2000.

### 3.4 Utilización de la información para fines agropecuarios

Los datos meteorológicos y climáticos se utilizan, entre otros usos como herramienta para:

- ◆ Caracterización agroclimática de una región (estadísticas climatológicas).
- ◆ Planificación de las labores culturales (pronóstico meteorológico).
- ◆ Pronóstico de cosecha (pronóstico a largo plazo o climático).

- ◆ Comercialización (los precios fluctúan de acuerdo al pronóstico).
- ◆ Lucha contra adversidades, granizo, heladas (pronóstico meteorológico).
- ◆ Prevención de Catástrofes naturales: incendio, inundaciones, sequías (pronóstico meteorológico y climático)
- ◆ Pronóstico de ataque de plagas y enfermedades (pronóstico meteorológico).
- ◆ Diseños de sistemas productivos (estadísticas climatológicas).
- ◆ Evaluación de riesgo de deterioro ambiental (clasificación climática y pronóstico climático).
- ◆ Planificación agroeconómica a mediano y largo plazo (pronóstico climatológico).
- ◆ Aplicación de fertilizantes (pronóstico meteorológico).

Además, investigadores o analistas privados, a partir de los datos originados por el SMN, realizan distintos tipos de análisis de la información con el objeto de poner a disposición de economistas, agrónomos, productores y usuarios en general, informes que posibiliten una interpretación ágil y simple para la planificación de distintas actividades.

### **3.5 Observaciones satelitales**

Los crecientes requerimientos de información confiable para realizar un correcto diagnóstico de la situación meteorológica imperante, conocer la situación meteorológica regional, así como también los diferentes impactos climáticos que de ella deriven, evidencian la necesidad de contar con instrumental y equipos capaces de brindar dichos servicios.

En la época actual dicho servicio lo prestan los satélites. Los sistemas de recolección de datos vía satélite proporcionan un medio seguro y económico de concentrar en un punto la información proveniente de sitios remotos distribuidos sobre una gran extensión geográfica ayudando de esta manera a agrónomos, meteorólogos, hidrólogos, oceanógrafos y otros especialistas a obtener imágenes de la superficie y atmósfera terrestre que permitan obtener un diagnóstico de las situaciones reinantes.

Desde comienzos de la década del '70 nuestro país ha incorporado la información meteorológica satelital dentro del SMN para un mejor diagnóstico de la situación meteorológica.

Los satélites poseen sensores para medir y analizar la radiación electromagnética reflejada, transmitida, absorbida y dispersada por la atmósfera y la superficie terrestre. Específicamente en meteorología, los datos de sensores remotos se usan principalmente para:

- Monitorear sistemas frontales y tormentas tropicales
- Perfiles verticales de temperatura
- Perfiles verticales de presión
- Contenido de vapor de agua
- Velocidad del viento
- Tipo de cobertura nubosa, extensión y temperatura de la misma

#### **3.5.1 Satélites y sensores**

##### **Clasificación de los satélites meteorológicos utilizados en la recolección de datos**

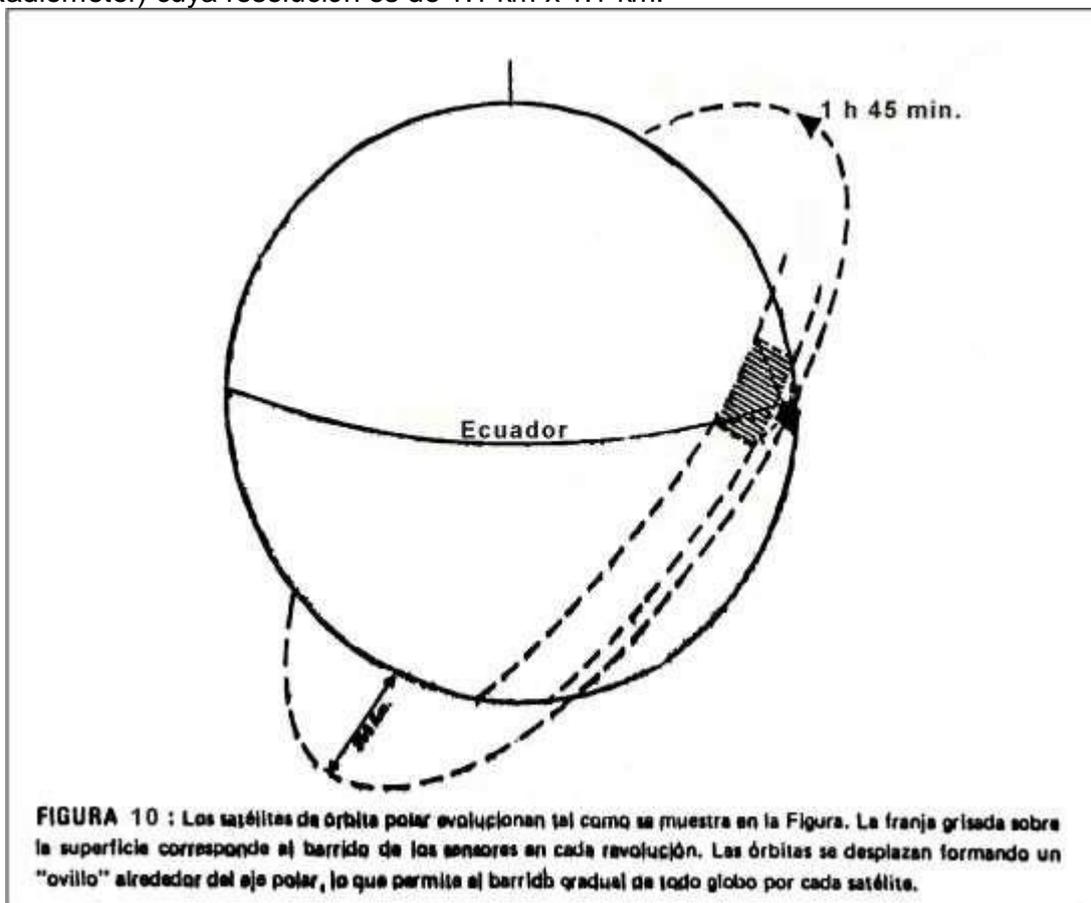
Se clasifican según su órbita en satélites de polares y geoestacionarios.

1 - **SATELITES DE ORBITA POLAR:** Giran alrededor de la Tierra cruzando por sobre las regiones polares a una altura aproximada de 850 km (Figura 10). Pasan por el mismo lugar de la tierra dos veces por día y mediante catorce órbitas obtienen

información de todo el globo terrestre. Actualmente se recibe información de los satélites de la serie TIROS-N (USA) en alta y baja resolución. En este momento están operando los NOAA-7 y NOAA-8 cuya resolución es de 1 a 4 km.

**2 - SATELITES GEOESTACIONARIOS:** Permanecen estacionarios con respecto a la Tierra, de modo tal que siempre observan la misma región del globo. Por ello se los coloca en órbita sobre el ecuador a una altura de 36.000 km (Figura 11). Actualmente se obtiene información de los satélites de la serie GOES (USA) en alta y baja resolución. Mediante la instalación de cuatro satélites geoestacionarios es posible obtener información de todo el globo terrestre. Por nuestra ubicación geográfica, nuestro país recibe información del satélite GOES-E (GOES-ESTE) ubicado cercano al Ecuador a los 75° de longitud oeste. Se reciben imágenes con una resolución de hasta 1 km en el espectro visible (sólo se puede obtenerlas cuando el sol ilumina la zona) e infrarrojo (da una idea de la distribución de calor en la atmósfera. No depende de la iluminación del Sol por lo que es posible obtener información nocturna).

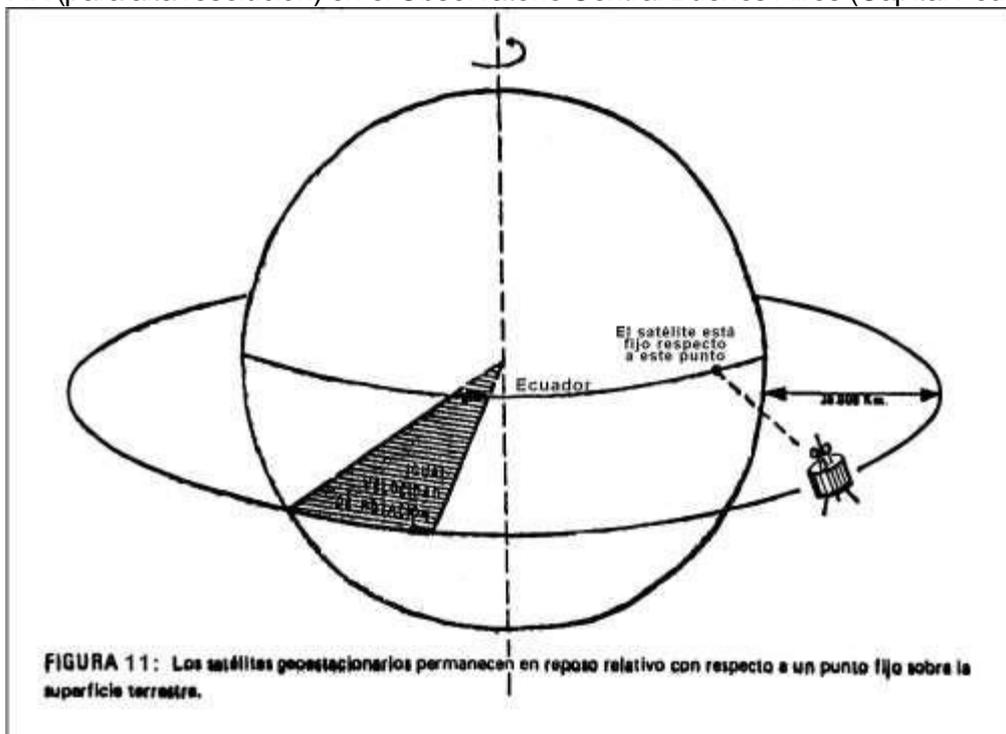
Los sensores que poseen los satélites son radiómetros que les permiten radiación visible, infrarroja o microondas. Por ejemplo, el instrumento principal que poseen los satélites de la serie NOAA es el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) cuya resolución es de 1.1 km x 1.1 km.



### 3.5.2 Recepción de los datos enviados por los satélites meteorológicos

Las imágenes y datos captados por los satélites son transmitidos continuamente hacia la tierra, siendo recibidos por las estaciones que se encuentran a su paso, mediante un equipo terrestre sencillo que consta de antena, receptor y registrador de imágenes, para baja resolución y un equipo más complejo para la recepción en alta resolución.

En nuestro país, el Servicio Meteorológico Nacional ha instalado una red de estaciones APT (Sistemas de transmisión automática de imágenes desde satélites en baja resolución). Estas estaciones están ubicadas en la Base Marambio (Antártida Argentina), Comodoro Rivadavia (Chubut) y Ezeiza (Buenos Aires) y una estación de APT-AR (para alta resolución) en el Observatorio Central Buenos Aires (Capital Federal).



### 3.5.3 Servicio que prestan los satélites meteorológicos

#### EN TIEMPO REAL (uso operativo)

- Datos horarios de temperatura, presión, etc. de plataformas automáticas
- Determinación de temperatura de cuerpos de agua o tierra.
- Delimitación de áreas inundadas, zonas de precipitación, áreas nevadas.
- Estado de redes camineras.
- Detección de áreas sembradas, deforestadas o desérticas.
- Evaluación de movimientos de corrientes marinas y su delimitación.
- Configuraciones térmicas y ópticas de los sistemas nubosos.
- Estimación de los movimientos del campo nuboso.

#### EN TIEMPO DIFERIDO (se archiva y luego se procesa)

- Elaboración de estadísticas gráficas.
- Elaboración de Atlas Climático.
- Delimitación de áreas sembradas.
- Aporte para el pronóstico de cosechas.
- Contaminación en áreas urbanas.
- Modificación artificial del tiempo: lucha antigranizo, prevención de heladas.

### BIBLIOGRAFÍA

- Gómez Morales S.B. y Arteaga Ramírez R. 1987. Elementos básicos para el manejo de instrumental meteorológico. 182 pag.

- Guía de trabajos prácticos de meteorología y climatología agrícolas, 1987, UBA.
- La Observación Meteorológica. Boletín Informativo Nro. 32. 1987. Servicio Meteorológico Nacional, Fuerza Aérea Argentina.
- Servicio Meteorológico Nacional. 1985. Satélites Meteorológicos. Boletín Informativo N° 11. Fuerza Aérea Argentina.
- TeraScan System Administrator Training Guide. Octubre 1998. Preparado por SeaSpace Corporation

## 4. ENERGIA ATMOSFERICA

### 4.1 INTRODUCCION

El Sol es la principal fuente de energía para los procesos físicos y biológicos que se desarrollan en la superficie terrestre. Esta radiación solar es muy importante, ya que representa prácticamente la totalidad de la energía que dispone la Tierra para dichos procesos (con excepción de una pequeña cantidad que proviene de la desintegración radiactiva de algunos minerales terrestres).

Los cambios regulares que experimenta la energía solar recibida en distintos lugares de la Tierra y en diferentes épocas del año, actúan como factor determinante de las temperaturas atmosféricas, que a su vez tienen una influencia decisiva en las variaciones de presión, sistemas de vientos, precipitación, corrientes marinas, etc. Estas variables en conjunto constituirán el clima de las distintas regiones de la Tierra.

Los valores que adopten los elementos del clima determinarán la aptitud agroclimática de esas zonas, definida según los requerimientos específicos de los distintos cultivos, en cuanto a temperatura, humedad, fotoperíodo etc. Estas regiones delimitarán las áreas potencialmente aptas para lograr los niveles máximos de producción. Es posible entonces, imaginar a la agricultura como un sistema de captación y transformación de la energía solar mediante la fotosíntesis, inmerso en el complejo sistema climático en el cual el rendimiento final de los cultivos depende, en última instancia, de la eficiencia con que es captada y utilizada esa energía.

### 4.2 MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

Los movimientos de la Tierra, como ya se definió anteriormente, son un factor astronómico, considerado como el más importante de todos, debido a que condicionan el ángulo con que los rayos del Sol inciden sobre la Tierra en distintas latitudes y en distintos momentos del día y del año, el recorrido aparente del Sol en el cielo, la duración del día y la sucesión de las estaciones. Esto a su vez determina las variaciones que sufre la energía solar recibida sobre la superficie.

La Tierra se encuentra sometida simultáneamente a dos movimientos, uno de rotación alrededor de un eje diametral inclinado y otro de traslación siguiendo una trayectoria alrededor del Sol.

#### 4.2.1 Movimiento de rotación

La Tierra gira sobre si misma, de oeste a este, su eje de rotación es una línea imaginaria que atraviesa la superficie terrestre en dos puntos, Polo Norte y Polo Sur. Este eje está inclinado  $66^{\circ} 34'$  con respecto al plano de la órbita terrestre.

La rotación de la Tierra provoca la alternancia de los días y las noches. El período de rotación, es decir, el tiempo necesario para que la tierra gire  $360^{\circ}$  es de 24 horas medido con respecto al Sol. Se define el **ángulo horario ( $\tau$ )** como el ángulo formado entre el meridiano en que se encuentra el Sol y el meridiano del lugar. Dado que la Tierra tarda 24 horas en girar  $360^{\circ}$  se deduce que en una hora recorrerá  $15^{\circ}$ ; al mediodía por definición el ángulo horario vale  $0^{\circ}$  (Figura4.1).

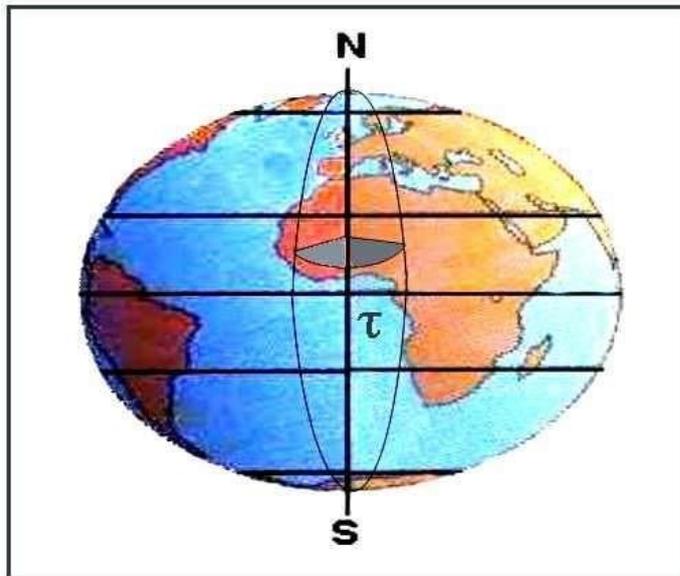


Figura 4.1. Angulo horario.

Este movimiento, sumado a la inclinación del eje de rotación hacen que la duración de los días y las noches no sean siempre igual, modificando en el transcurso del año la zona iluminada por el Sol (Figura 4.2). Se define **Heliofanía Astronómica (HA)** como el tiempo en que el Sol se encuentra por encima del horizonte.



Figura 4.2. Iluminación del globo

#### 4.2.2 Movimiento de translación

La Tierra también gira alrededor del Sol sobre su órbita, movimiento llamado de translación. El tiempo necesario para que la Tierra complete éste movimiento puede medirse de distintas maneras, para los fines de este curso se tomará como el tiempo transcurrido entre dos equinoccios vernales, y es de 365,25 aproximadamente. Por esto cada cuatro años se agrega un día extra al mes de febrero (años bisiestos).

Si miramos este movimiento de modo que veamos el Polo Norte de la Tierra, ésta se mueve en sentido contrario a las agujas del reloj. La órbita de la Tierra es una elipse y el Sol se encuentra en uno de los focos, la distancia media entre la Tierra y el Sol es de 150.000.000 kilómetros; en su punto más cercano, alrededor del 3 de enero, se encuentra a 147 millones de kilómetros y se lo denomina perihelio. Alrededor del 4 de julio, la distancia es máxima, y se dice que la Tierra se encuentra en su afelio, a una distancia de 152 millones de kilómetros (Figura 4.3). Estas diferencias en la distancia entre la Tierra y el Sol determinan cambios en la cantidad de energía solar recibida por nuestro planeta, en el **perihelio** es un 7 % superior a la que se recibe en el **afelio**, pero NO son la causa de las estaciones.

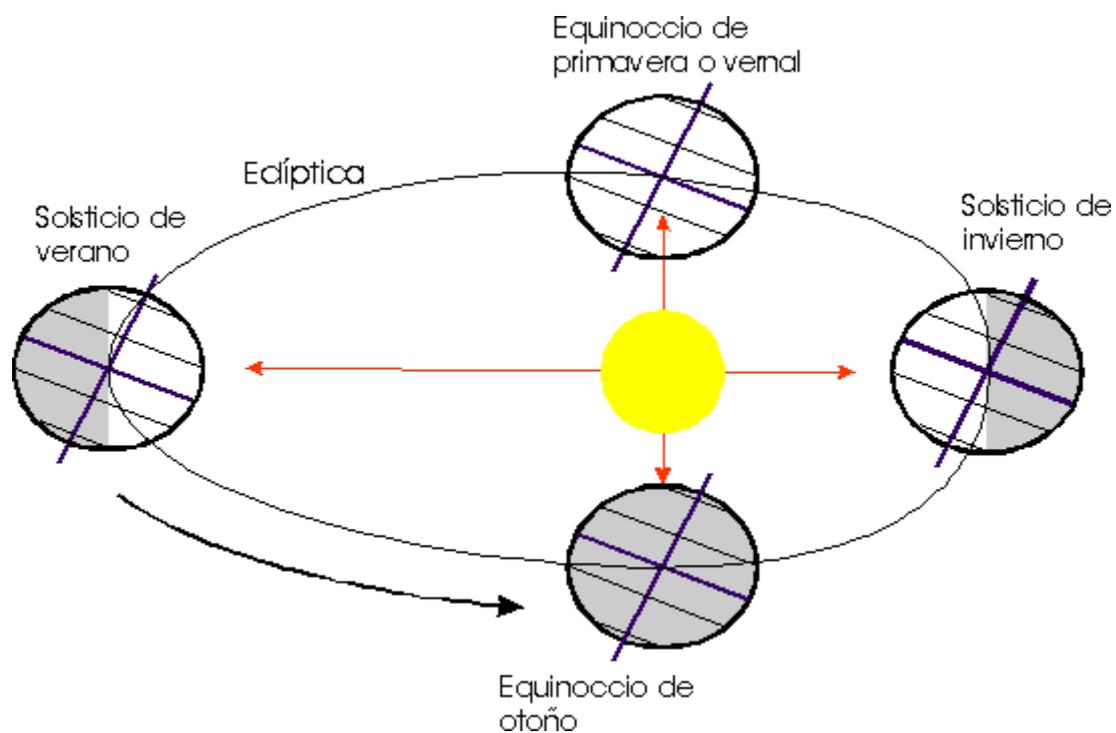


Figura 4.3 Movimiento de translación de la Tierra

Este movimiento puede apreciarse, también, observando la trayectoria aparente del Sol a lo largo del año a través de un ángulo denominado **declinación solar ( $\delta$ )**, determinado por los rayos del Sol y el plano del Ecuador. Varía diariamente, oscilando durante el año entre los valores de  $\pm 23.5^\circ$  (Figura 4.4). En los equinoccios la declinación solar vale cero, en el solsticio del 21 de junio la declinación solar vale  $+23,5^\circ$  y en el del 21 de diciembre vale  $-23,5^\circ$ .

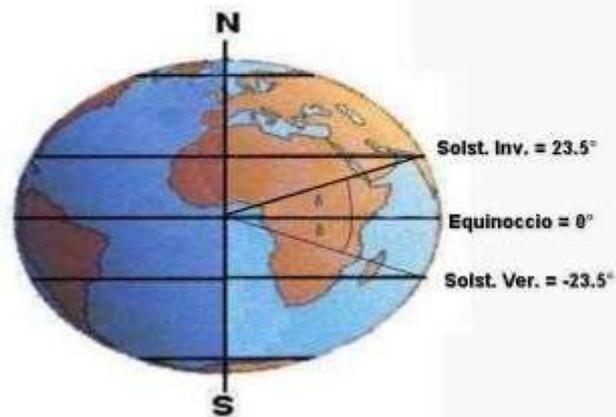


Figura 4.4: Angulo de declinación solar.

### 4.3 RADIACION SOLAR.

La energía del sol, transmitida a través del proceso de radiación, consiste en una "mezcla" de ondas electromagnéticas con diferentes longitudes de onda y frecuencias. Todas viajan a través del vacío a la velocidad de  $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . El rango de longitudes de onda es muy grande (Figura 4.5); sin embargo, es posible dividir el espectro solar en 3 bandas principales, cada una de las cuales contribuye con un determinado porcentaje a la energía total (Cuadro 4.1).

BANDA ( $\mu\text{m}$ )		% ENERGIA
0 - 0.3		1.2
0.3 - 0.4	ULTRAVIOLETA	7.8
0.4 - 0.7	VISIBLE – PAR	39.8
0.7 - 1.5	INFRARROJO CERCANO	38.8
Mayor de 1.5		12.4
		100.0

Cuadro 4.1. Aporte de energía de las bandas del espectro solar

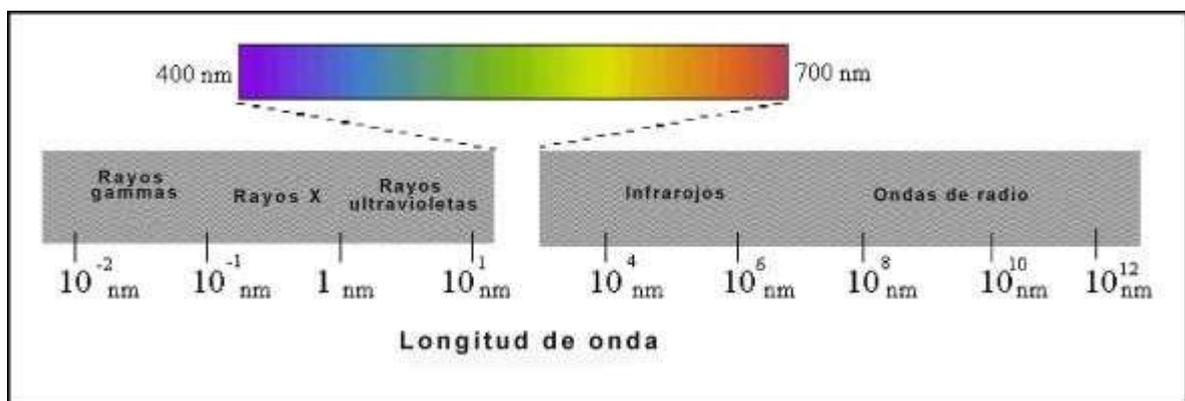


Figura 4.5: Espectro electromagnético

La energía solar que es utilizada en la transformación del agua y dióxido de carbono en hidratos de carbono mediante el proceso de fotosíntesis, es la que corresponde a la **banda visible** del espectro (400 a 700  $\mu\text{m}$ ), y por eso esta radiación también se denomina **radiación fotosintéticamente activa** o **PAR**. Además muchos procesos vinculados al desarrollo de las plantas dependen del estado del pigmento **fitocromo**, que absorbe radiación de las bandas centradas en 0.66 y 0.73  $\mu\text{m}$ .

### 4.3.1 Constante Solar

El Sol emite radiación en todas las direcciones, por lo que cualquier objeto que se encuentre a una cierta distancia recibirá energía, tanto mayor cuanto más cerca se encuentre. La Tierra, ubicada en promedio a 150 millones de kilómetros, recibirá  $2 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , cantidad que se define como constante solar.

La **constante solar** se define como: la cantidad de energía solar que se recibe en una **superficie perpendicular a los rayos solares, en ausencia de atmósfera a la distancia media Tierra-Sol** y es aproximadamente igual, como fue dicho, a  $2 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

#### DEDUCCIÓN DEL VALOR DE LA CONSTANTE SOLAR

La cantidad de radiación emitida por unidad de superficie del Sol estará dada por:

$$E_s = \sigma (T_s)^4 = 90.000 \text{ Cal/cm}^2 \cdot \text{min}$$

donde:  $\sigma$  = constante de Stefan - Boltzman ( $8,13 \times 10^{-11} \text{ cal cm}^{-2} \text{ }^\circ\text{K}^4 \text{ min}^{-1}$ )  
 $T_s$  = Temperatura absoluta ( $^\circ\text{K}$ )

La energía total emitida por la esfera solar puede calcularse teniendo en cuenta que el radio del Sol  $R_s = 7 \times 10^5 \text{ Km}$  y su temperatura  $T_s = 5800^\circ\text{K}$ :

$$E_s = \sigma T_s^4 4\pi R_s^2$$

Esta radiación se reparte en toda una esfera de radio igual a la distancia Tierra-Sol  $D_{ts} = 1.5 \cdot 10^8 \text{ km}$ . La cantidad de energía por unidad de superficie que recibe esta esfera es la **constante solar  $c_s$**  (ver Figura 4.2). Como toda la radiación que sale del Sol llega a esta esfera entonces:

$$\sigma T_s^4 4\pi R_s^2 = C_s 4\pi D_{TS}^2$$

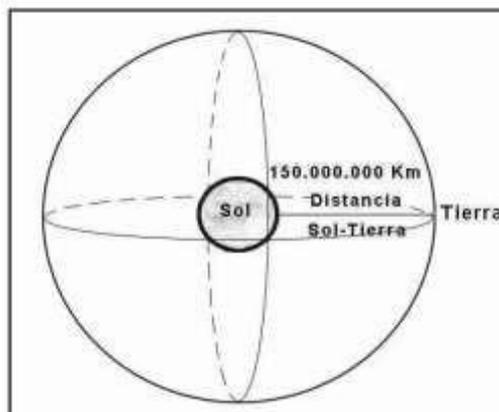


Figura 4.6: Esfera de radio igual a la distancia Tierra – Sol

Despejando la **constante solar** se obtiene:

$$c = \sigma T_s^4 \left( \frac{R_s}{D_{is}} \right)^2 = 2 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{min}}$$

De esta manera es posible calcular la constante solar para los distintos planetas conociendo la distancia media sol-planeta.

También es posible calcular la constante solar ( $C_{sc}$ ) corregida en función de la distancia real a la que se encuentra la Tierra del Sol.

#### 4.3.2 Radiación recibida en una superficie horizontal en el límite superior de la atmósfera

Al hablar de **constante solar** se consideró una superficie perpendicular a los rayos solares, pero debido a que la Tierra es una esfera, muy ligeramente achatada, sólo un punto de la misma, que varía a lo largo del año entre  $\pm 23,5^\circ$  de latitud, presenta un ángulo recto entre los rayos del Sol y la superficie terrestre. En cuanto nos alejamos de ese punto, debido a la curvatura de la Tierra, el ángulo es cada vez menor hasta hacerse cero (rayos tangentes a la superficie).

Si bien la energía emitida por el Sol es siempre la misma (sin tener en cuenta las manchas solares), la radiación solar recibida sobre una superficie **A**, normal a los rayos, (Figura 4.7) será mayor que sobre **B**, debido a que la misma cantidad de energía se reparte en una superficie mayor.

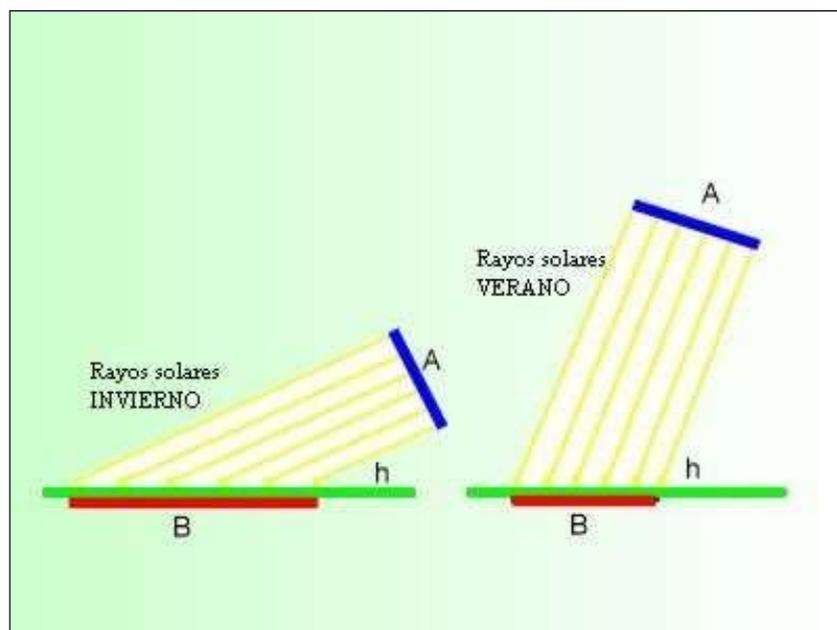


Figura 4.7. Relación entre la altura solar ( $h$ ) e insulación

La **ley del seno** permite cuantificar esa atenuación, estableciendo que la intensidad de radiación en una superficie horizontal es proporcional al seno del ángulo que forman los rayos con la superficie:

$$RA_i = C_{sc} \cdot \text{sen}(h) \quad (1)$$

Donde:

**RAI:** Radiación Atrónomica Instantánea

**Csc:** constante solar corregida

**h:** **altura solar** (ángulo formado por los rayos del Sol con la horizontal del punto de observación)

De esta manera, a través de la ecuación (1) podemos obtener la cantidad de radiación recibida por unidad de superficie y tiempo, en cualquier punto de la Tierra sin considerar la atmósfera.

Analizando el ángulo de **altura solar (h)**, se observa que varía entre cero al amanecer y atardecer y un valor máximo que se registra al mediodía. Sólo en algunas latitudes será de  $90^\circ$ ; en Buenos Aires, por ejemplo, la altura solar nunca llega a ese valor (Figura 4.8). Este ángulo va a depender de la **latitud ( $\varphi$ )** (ángulo formado por la vertical del lugar con el plano del ecuador, por convención, se consideran ángulos negativos para el Hemisferio Sur); de la hora del día y por último del momento del año en que se encuentre.

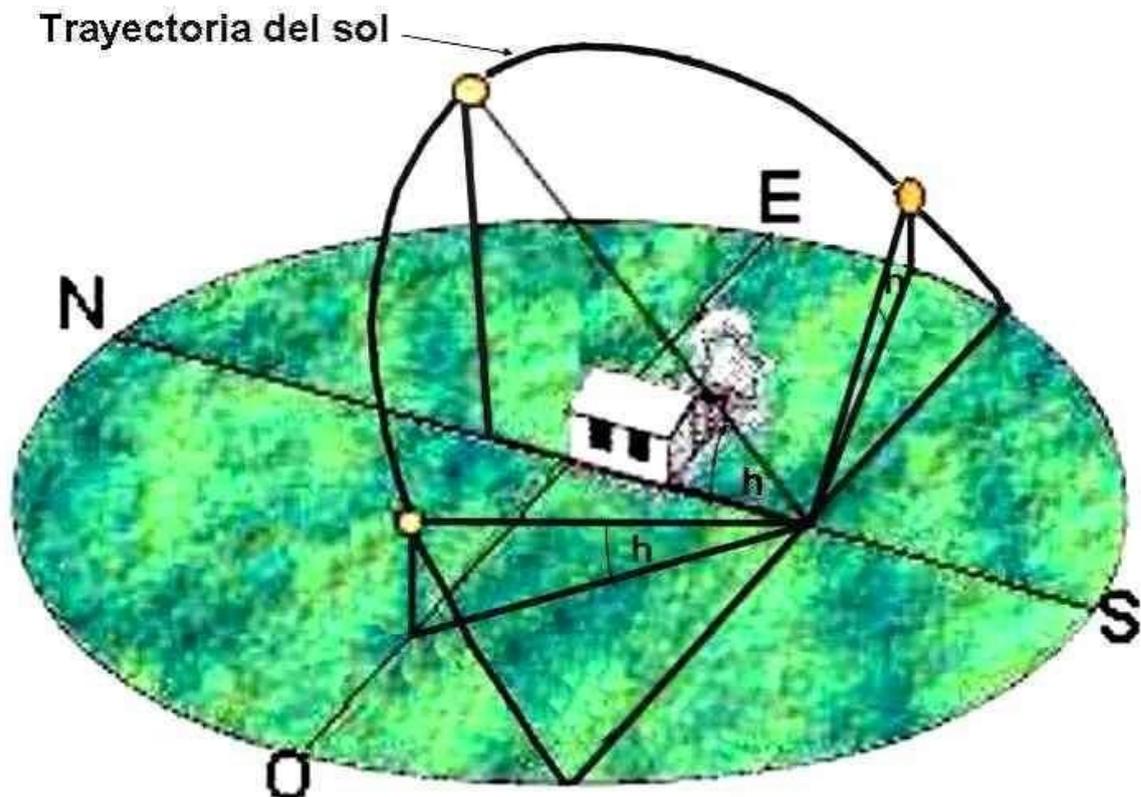


Figura 4.8: Trayectoria y altura del Sol en un día de verano para una latitud intermedia.

**La altura del Sol**, es por lo tanto, **función de la latitud del lugar ( $\varphi$ )**, **la época del año** (medida a través de la declinación solar  $\delta$ ) y **la hora del día** (dada por el ángulo horario  $\tau$ ).

Utilizando trigonometría esférica se puede llegar a la **ecuación del tiempo**, que integra todos estos factores y que permite calcular cualquiera de ellos conociendo el resto de los ángulos. La ecuación está dada por:

$$\text{sen } h = \text{sen } \delta \text{ sen } \varphi + \text{cos } \delta \text{ cos } \varphi \text{ cos } t \quad (2)$$

Si reemplazamos en la ecuación (1) el seno de la altura del sol por la ecuación (2) obtenemos:

$$RA_i = C_{sc} \cdot (\text{sen } \delta \text{ sen } \varphi + \text{cos } \delta \text{ cos } \varphi \text{ cos } t) \quad (3)$$

Para calcular la radiación recibida a lo largo de todo un día (Radiación Astronómica diaria RA) se integra la ecuación (3) entre la hora de salida y puesta del sol (**H**) obteniendo la expresión:

$$RA = \frac{24 \cdot 60}{\pi} C_{sc} [H \text{ sen } \varphi \text{ sen } \delta + \text{cos } \varphi \text{ cos } \delta \text{ sen } H] \quad (4)$$

Esta ecuación permite calcular la radiación astronómica que recibe cualquier punto de la Tierra en ausencia de atmósfera. Por lo tanto la ecuación (1) difiere de la ecuación (4) solamente en el período de tiempo en que ha sido calculada, siendo en el primer caso radiación instantánea y en el segundo integrada en todo un día.

Las regiones polares reciben la cantidad máxima de Radiación Astronómica (RA) durante los solsticios de verano, que corresponden a los períodos de día continuo. La cantidad de RA recibida durante el solsticio de diciembre (perihelio) en el hemisferio sur es mayor que la recibida por el hemisferio norte durante el solsticio de junio (afelio) a causa de la órbita elíptica. En el Ecuador se observan máximos de Radiación Astronómica en los equinoccios, porque los rayos del Sol inciden en forma perpendicular en ese momento, y mínimos en los solsticios (Figura 4.9).

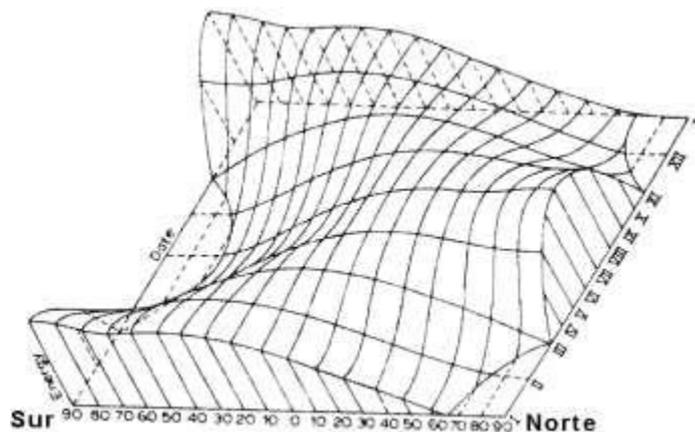


Figura 4.9. Diagrama tridimensional de la Radiación Astronómica diaria.

Mediante la ecuación del tiempo es posible también, obtener una expresión que permita calcular la **duración del día (solar) o heliofanía astronómica (HA)**.

En el momento de la salida o puesta del Sol la altura del Sol ( $h$ ) es cero, luego reemplazando en (2) se obtiene:

$$0 = \text{sen}\delta \cdot \text{sen}\varphi + \text{cos}\delta \cdot \text{cos}\varphi \cdot \text{cost} \quad (5)$$

despejando el ángulo horario ( $\tau$ ),

$$\tau = \text{arcos}(-\text{tg}\delta \cdot \text{tg}\varphi) \quad (6)$$

dado que el Sol recorre  $15^\circ$  en una hora, y habiendo calculado el ángulo horario de la puesta del sol, puedo saber cuanto tiempo tardó el Sol desde el mediodía hasta el ocaso, por lo tanto multiplicando por dos se obtiene la HA,

$$HA = \frac{2}{15} \text{arcos}(-\text{tg}\delta \cdot \text{tg}\varphi) \quad (7)$$

La **heliofanía efectiva (HE)** expresa la duración del brillo solar y es igual a la heliofanía astronómica (HA) menos las horas en que el cielo estuvo cubierto. El cociente entre la heliofanía efectiva y la astronómica es la **heliofanía relativa**.

Algunos procesos de desarrollo en plantas y animales responden aún a los bajos niveles de intensidad de radiación recibida durante los **crepúsculos**, antes del amanecer y después de la puesta del Sol. Esta iluminación difusa prolonga el período de aprovechamiento de luz diurna de manera notable, especialmente en las latitudes altas. Ambos períodos de luz crepuscular son de igual duración y naturaleza.

La duración de la luz crepuscular depende de la densidad de la atmósfera y de la velocidad con que el Sol sale o desaparece tras el horizonte. Suponiendo una atmósfera de densidad uniforme con una distribución también uniforme de partículas en suspensión, la duración de la luz crepuscular dependerá del recorrido del Sol en el cielo, que, a su vez, depende de la latitud.

Se denomina **fotoperíodo (F)** a la suma de la heliofanía astronómica (HA) más ambos crepúsculos civiles, definidos como el tiempo en que el Sol se encuentra  $6^\circ$  por debajo del horizonte (Figura 4.10).

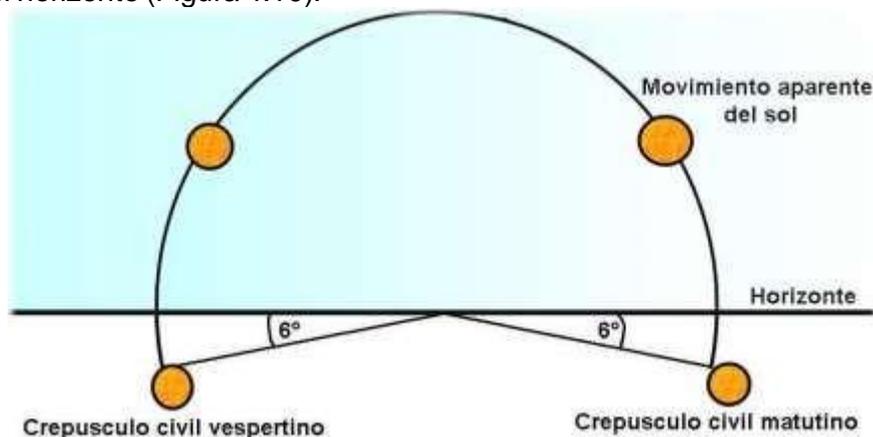


Figura 4.10: Heliofanía astronómico y crepúsculos civiles

El fotoperíodo ( $F$ ), se calcula a partir de la ecuación del tiempo (2) considerando la altura solar de  $-6^\circ$ , despejando y de la misma manera que se calculó la heliofanía astronómica,

$$F = \frac{2}{15} \frac{\sin(-\theta) - \sin\varphi \cdot \sin\delta}{\arccos(\cos\varphi \cdot \cos\delta)} \quad (7)$$

#### 4.4 ATENUACION DE LA RADIACION SOLAR EN LA ATMOSFERA

La atmósfera tiene un comportamiento selectivo, es decir que absorbe y emite radiación en ciertas longitudes de onda y es transparente a otras. Lo mismo pasa con el vidrio: absorbe algo de la radiación infrarroja y ultravioleta y deja pasar la visible. Cuando los rayos llegan a la atmósfera terrestre una parte la atraviesa sin modificarse (**transmisión**), otra es absorbida por la atmósfera (**absorción**), otra es dispersada (**dispersión**) y otra parte puede ser reflejada al espacio (**reflexión**). En la atmósfera la radiación solar se modifica en cantidad, calidad y dirección mediante estos procesos.

##### 4.4.1. Absorción

Este proceso implica un calentamiento de la atmósfera. El **oxígeno**, el **ozono** y el **vapor de agua** son los responsables más importantes de la radiación solar absorbida seguidos por el **dióxido de carbono** (Figura 4.11).

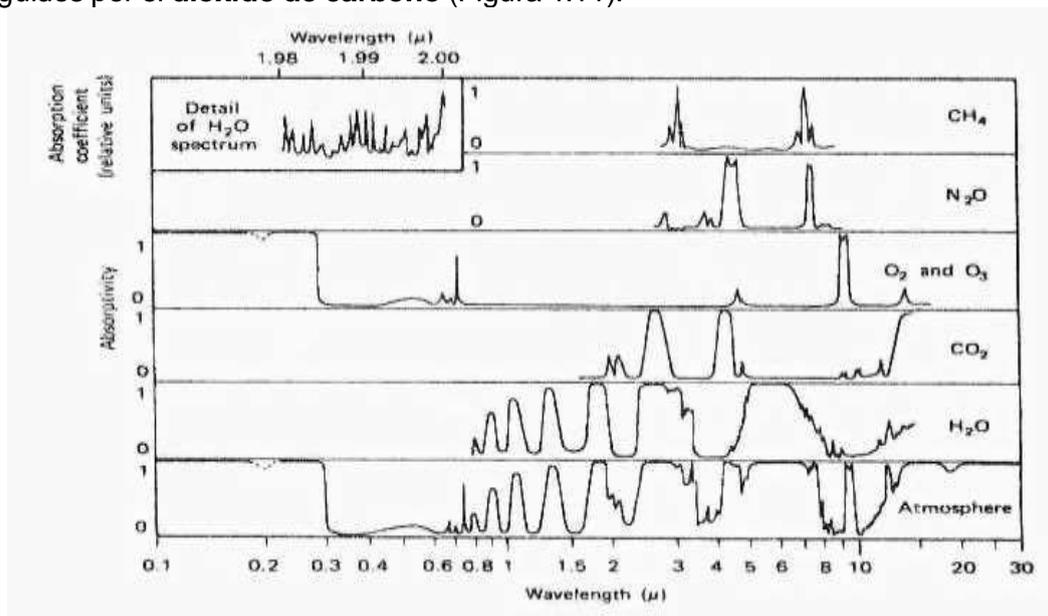


Figura: 4.11: Espectro de absorción para algunos gases atmosféricos.

El **ozono** y el **oxígeno** absorben, en la parte superior de la atmósfera (por encima de los 10 km), casi el 100% de las longitudes de onda inferior a 0.30  $\mu\text{m}$ , que corresponde a la **banda ultravioleta** del espectro. Por esta razón, solamente una pequeña fracción ultravioleta llega a la superficie terrestre. El **ozono** es responsable del calentamiento de la estratósfera.

En la **región visible**, la absorción es muy pequeña, y se produce principalmente por el **ozono** y el **oxígeno molecular**. En la **región infrarroja**, la absorción es muy importante, actuando el **vapor de agua** (entre 0.9 y 3  $\mu\text{m}$  en distintas bandas) y el **dióxido de carbono** (entre 1.5 y 9  $\mu\text{m}$ , en algunas bandas). Esta absorción tiene lugar en la porción de la atmósfera más cercana al suelo, donde la concentración de estos gases es importante.

Las pequeñas gotas de agua líquida presentes en las nubes también absorben selectivamente casi toda la radiación infrarroja pero muy poco la visible.

En resumen, la atmósfera es esencialmente transparente entre 0.3 y 0.8  $\mu\text{m}$ , longitudes de onda que representa el mayor aporte de energía del espectro solar.

#### 4.4.2. Dispersión

Hay ciertos constituyentes de la atmósfera que desvían la radiación en todas las direcciones. Este proceso se denomina **dispersión o difusión**. Durante este proceso las partículas no ganan ni pierden energía, por lo tanto su temperatura permanece constante. Cada una de las partículas actúa como un obstáculo en el camino seguido por la energía, de manera parecida a como las rocas estorban el progreso del agua.

Este proceso es causado por partículas pequeñas, tales como las moléculas de los gases que componen la atmósfera, polvo muy fino, humo y contaminantes conocidos como aerosoles. La eficacia de una partícula como centro de dispersión depende de su diámetro.

La magnitud de la absorción y dispersión depende del espesor de la capa de atmósfera que tenga que recorrer el rayo de sol y de la cantidad de partículas "atenuadoras" existentes en esa capa (grado de turbidez). El espesor de atmósfera que debe atravesar los rayos sol varía con la altura solar.

Cada molécula de oxígeno y nitrógeno del aire es un dispersor selectivo, ya que las longitudes de onda más cortas (correspondientes a los colores violeta, azul, verde, en el espectro visible) son mejor dispersadas que las de longitudes más largas (colores amarillo, naranja, rojo). El color celeste del cielo durante el día se produce por la combinación de la dispersión del violeta, azul y verde en todas las direcciones. Los colores amarillos o rojizos aparecen durante el amanecer o atardecer cuando es mayor la capa de atmósfera que deben atravesar los rayos solares.

Las gotas de agua de una nube, al tener mayor diámetro, difunden todas las longitudes de onda de la radiación visible por igual haciendo que se vea blanca. Las gotas más grandes absorben más radiación y son menos efectivas como partículas dispersoras de luz, explicando el color oscuro de las nubes de tormenta.

Cuando en la atmósfera están presentes partículas de polvo pequeñas, el color del cielo comienza a cambiar adquiriendo un tono blanquecino. El fenómeno asociado a esto se denomina bruma y las partículas que la constituyen son lo suficientemente grandes como para dispersar igualmente a todas las longitudes de onda del espectro visible. Este efecto se puede acentuar con la presencia del vapor de agua. El color del cielo, entonces, puede dar una idea del material en suspensión que hay en la atmósfera. Cuanto más partículas de éstas hay, mayor es la dispersión y más blancuzco aparece el cielo. En el tope de una montaña se está por encima de la mayoría de estas partículas y es posible ver el cielo de un azul celeste profundo.

#### 4.4.3 Reflexión

Las nubes son las encargadas, en la atmósfera, de **reflejar** la energía entrante del Sol, es decir cambiar la dirección de los rayos con un ángulo igual al incidente sin variar la calidad de los mismos. El porcentaje de energía reflejada respecto de la incidente se denomina **albedo**.

El albedo de las nubes es muy variable, dependiendo del tipo de nube. Los valores se encuentran entre 20 y 80%.

### 4.5 RADIACION SOLAR EN LA SUPERFICIE (INSOLACION)

#### 4.5.1 Radiación directa y difusa

Como consecuencia de la atenuación por la atmósfera, la **insolación** (radiación solar en la superficie terrestre) proviene de dos "contribuciones". La **radiación solar directa** es la que tiene la dirección de los rayos solares y alcanza la superficie terrestre luego

de atravesar la atmósfera y la **radiación difusa** que es la dispersada por la atmósfera y la transmitida por las nubes, que se recibe desde todas las direcciones. La suma de la radiación directa y difusa se conoce como **radiación global**, y se mide sobre una superficie horizontal.

La **radiación directa** que llega al suelo, medida en forma perpendicular a los rayos raramente supera el 75% de la constante solar. La intensidad de la radiación directa varía con la latitud y con la época del año (ecuaciones 2 y 4).

El espectro de la radiación directa depende del "camino" del rayo, y por lo tanto de la altura solar. En un cielo claro, para alturas del sol entre 30 y 50°, la energía está prácticamente concentrada en el espectro visible, desplazándose hacia el infrarrojo cuando el Sol se acerca al horizonte.

En una atmósfera limpia y sin nubes la radiación difusa constituye entre un 10 y 15% de la radiación global pudiendo alcanzar hasta un 30 a 40% en latitudes medias y algo más en altas latitudes. A medida que el grado de turbidez (presencia de aerosoles) aumenta, también lo hace la relación difusa/global. Esto también ocurre al aumentar la

$$RG = RD + Rd \quad (8)$$

cantidad de nubes. Bajo un cielo cubierto o durante los crepúsculos, la insolación recibida en la superficie es totalmente radiación difusa. En cuanto a la composición espectral de la radiación difusa, valen las mismas consideraciones que para la directa.

La **radiación global** sobre una superficie horizontal está dada por:

En un día sin nubes, la marcha de radiación global es aproximadamente sinusoidal. Esta forma está distorsionada por la presencia de nubes. El total diario de radiación global se ve reducido por la nubosidad, dependiendo del tipo de nubes y de la altura solar. La reducción puede representar hasta el 20% de la insolación que correspondería a un cielo sin nubes.

Los cambios en la **insolación** durante el año son muy complejos, dependiendo de los cambios estacionales en los contenidos de vapor de agua y aerosoles en la atmósfera y de la distribución estacional de las nubes.

#### 4.4.2 Albedo

Parte de la radiación que llega a la superficie terrestre es reflejada hacia el espacio. El **albedo** (o **coeficiente de reflexión para todo el espectro de onda corta**) depende de las características de las superficies y en algunos casos de la altura solar.

El albedo de una superficie de agua depende del ángulo de incidencia de los rayos solares, cuanto mayor es este ángulo de incidencia menor es el albedo (Cuadro 4.2).

Superficie terretre	Albedo (%)	Superficie de agua con distinta altura del sol	Albedo (%)
Bosques	15	5°	40
Pastos secos	30	10°	25
Campo arado	15	20°	12
Nieve fresca	80	30°	6
Nieve vieja	50	40°	4
Nubes	75	50°	3
Pradera	25	70°	3
Arena seca	20	90°	3

Cuadro 4.2 Distintos valores medios de albedo

En el caso de los suelos, el albedo depende principalmente del contenido de materia orgánica y agua, del tamaño de las partículas y del ángulo de incidencia del Sol. Estos coeficientes varían desde 10% para suelos con alto contenido de materia orgánica hasta 30% para desiertos de arena.

El albedo disminuye a medida que aumenta el contenido de agua. La experiencia diaria muestra que las superficies húmedas aparecen más oscuras que las secas. Se encontró que el albedo de la arena disminuye desde 20 a 10% cuando se humedece.

Para la mayoría de los tipos de vegetación se presentan variaciones en el albedo según la altura solar y la altura de la vegetación. Los máximos valores se presentan sobre superficies relativamente suaves y de baja altura (35%). Para cultivos entre 0.5 y 1.0 m y cobertura completa estos valores disminuyen (18-25%) encontrándose valores de hasta 10% para bosques. Los suelos arados, con pasto o rocosos tienen un albedo que oscila entre el 10 y el 30 % (Cuadro 4.2).

#### 4.5 RADIACION TERRESTRE Y ATMOSFERICA

En función de su temperatura la superficie terrestre, cualquiera sea su naturaleza, emite radiación en onda larga (**radiación terrestre**), correspondiente a las longitudes de onda entre los 3 y 100  $\mu\text{m}$ . Para una temperatura en la superficie de 288 °K (15 °C) la máxima cantidad de energía emitida se produce en la longitud de onda de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .

La mayor parte de la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre es absorbida en bandas específicas por los gases de la atmósfera, principalmente **vapor de agua** y **dióxido de carbono** (Figura 4.11). Estos gases tienen un espectro de emisión similar a su espectro de absorción. Una parte de la radiación emitida por la atmósfera se pierde hacia el espacio y otra, denominada **contrarradiación atmosférica**, alcanza la superficie terrestre generando lo que se conoce como **efecto de invernáculo de la atmósfera**, es decir un comportamiento caracterizado por una gran transparencia a las radiaciones solares de onda corta, una elevada absorción de las ondas largas terrestres y la devolución de una buena parte de ellas de nuevo a la superficie atrapando en el sistema una importante cantidad de energía.

Es de esperar que parte de la **contrarradiación** sea reflejada por el suelo pero los coeficientes de reflexión para la onda larga son generalmente menores a 5%. Por ejemplo la nieve, que refleja aproximadamente un 80% de la radiación solar de onda corta, refleja como máximo un 0.5% de la **contrarradiación atmosférica** incidente.

El flujo de **radiación terrestre** puede ser medido mediante un radiómetro o estimado a partir del conocimiento de la temperatura y la emisividad de la superficie. La **contrarradiación** puede ser también medida con un radiómetro, o calculada conociendo la distribución de temperatura y vapor de agua en la atmósfera. En general, más de la mitad de la **contrarradiación** recibida en la superficie proviene de los gases que se encuentran en los primeros 100 m de atmósfera y el 90% en los primeros 1000 m., desde la superficie. Por eso la magnitud de este flujo está fuertemente determinada por los gradientes de temperatura cercanos al suelo. La presencia de nubosidad incrementa la **contrarradiación** debido a la emisión de las gotas de agua en la banda 8 a 13  $\mu\text{m}$ , correspondiente a la "**ventana atmosférica**" constituida por las radiaciones entre 8 y 13  $\mu\text{m}$  que no son absorbidas por la atmósfera. Esto depende del tipo de nubes y del grado de cobertura.

El **balance de onda larga** para la superficie terrestre, o sea la diferencia entre la contrarradiación y la radiación terrestre, se llama **radiación efectiva** y es siempre negativo.

## 4.6 EQUILIBRIO ENERGETICO DEL SISTEMA TIERRA-ATMOSFERA

### 4.6.1 Balance de radiación

Todas las superficies reciben radiación de onda corta durante el período diurno e intercambian radiación de onda larga continuamente con la atmósfera. En el **balance de radiación** se consideran los diferentes flujos que ingresan al sistema (en este caso una superficie) y los que salen de éste. Los primeros son considerados "positivos" y constituyen la ganancia de energía, en tanto los otros representan una pérdida y se consideran "negativos". La cantidad neta de radiación en una superficie está definida por la siguiente ecuación de balance:

$$R_n = RD + Rd - R_r - RT + CR \quad (9)$$

donde: **Rn: Radiación neta**

**RD: Radiación directa**  
**Rd: Radiación difusa**  
**Rr: Radiación reflejada o Albedo**  
**RT: Radiación terrestre**  
**CR: Contrarradiación atmosférica**

La anterior ecuación puede escribirse también:

$$R_n = (1 - \alpha)RG + Bol \quad (10)$$

donde: **RG: Radiación global**  
 **$\alpha$ : Albedo**  
**Bol: balance de onda larga**

Mediante un balance de radiación se puede conocer el grado de enfriamiento y/o calentamiento de un sistema, por ejemplo del ambiente que existe dentro de un invernáculo en la ladera de un valle. El resultado de este balance, si es negativo, indicará disminución de la temperatura y si es positivo, indicará aumento de ésta. Las variaciones anuales y diurnas de temperatura del suelo y del aire están directamente relacionadas con el balance local de radiación.

### 4.6.2 Balance de radiación de la Tierra

En términos de un balance global de radiación, en promedio debe producirse un equilibrio entre la energía que absorbe la atmósfera y la Tierra (onda corta) y aquella que emite el planeta al espacio (onda larga). El calentamiento de la superficie terrestre por absorción de radiación solar es función de la latitud; tiene un máximo en las zonas ecuatoriales y un mínimo en los polos. La radiación saliente (onda larga) en cambio varía muy poco con la latitud. Tiene un mínimo en las regiones polares y máximos cercanos a los trópicos. De este modo se observa un exceso en el balance radiativo de la superficie terrestre en las bajas latitudes, y se nota un déficit cerca de los polos.

En cuanto a su distribución espacial, como consecuencia de la considerable absorción de energía solar por el mar, la radiación neta es mayor sobre los océanos - donde excede de  $120 \text{ Kcalcm}^{-2}\text{año}^{-1}$  entre  $15$  y  $20^\circ$  de latitud- que sobre las zonas continentales, donde adopta valores entre  $60$  a  $80 \text{ Kcalcm}^{-2}\text{año}^{-1}$  para las mismas latitudes. La radiación neta es también bastante menor en las zonas continentales áridas que en las húmedas, porque a pesar de que reciben mayor insolación debido a su cielo despejado, también la pérdida por radiación terrestre neta es más elevada.

El balance de radiación se esquematiza en la Figura 4.12, con los valores porcentuales referidos a la radiación incidente en el tope de la atmósfera.

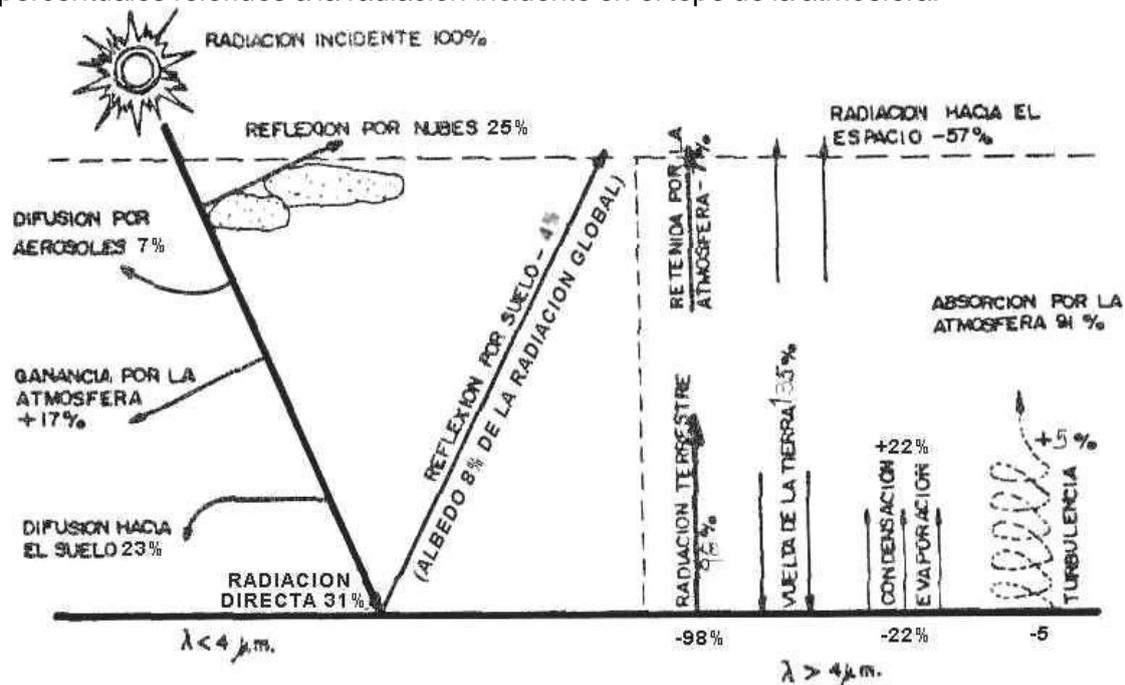


Figura 4.12: Balance de Radiación

#### 4.6.3 Balance calórico o de energía

La radiación neta representa una medida de la energía disponible en la superficie de la tierra para utilizarse en procesos como la evaporación, calentamiento del aire o del suelo o para la fotosíntesis. Estos procesos involucran transferencias de energía por **conducción, convección o calor latente o de cambio de estado de agua**. Los valores de los flujos involucrados en los procesos mencionados, sumados a los términos de radiación que forman parte de la radiación neta compondrán el **balance calórico o de energía**. Se puede escribir entonces:

$$Bc = E + H + G \quad (11)$$

donde: **Bc: Balance calórico**  
**E: Flujo de calor latente**  
**H: Flujo de calor sensible**

**G: Flujo de calor hacia el suelo**

La importancia relativa de cada uno de los términos dependerá de la escala temporal y del tipo de superficie elegida.

El flujo de calor hacia adentro y afuera del suelo es un proceso de **conducción**. El calor es transportado a través del suelo de molécula a molécula por movimientos vibratorios. Grandes cantidades de energía se transfieren entre la superficie y el aire por el proceso de **convección**. Son los movimientos turbulentos, de sentido preferentemente vertical, que permiten el transporte de aire más caliente hacia zonas más frías. Este flujo de calor se denomina **flujo de calor sensible** ya que su transferencia determina la temperatura del aire, una propiedad que podemos "sentir". En general, durante el día, la superficie está más caliente que el aire sobrepuesto y por lo tanto el transporte se realiza desde el suelo hacia él, calentándolo. Desde luego, cuando el suelo está más frío recibe calor del aire que hay encima enfriándolo.

El último, pero no por ello menos importante, es el **calor latente**, asociado a los cambios de estado del agua, principalmente a la **evaporación y condensación**. A medida que se evapora, la energía calorífica necesaria para este proceso queda almacenada en forma latente en el vapor de agua. Este vapor se difunde y se mezcla en la atmósfera inferior mediante los movimientos de la misma, transportando el calor latente. La condensación en las nubes y la precipitación en forma de lluvia y nieve libera ese calor latente en forma de calor sensible, elevando la temperatura de la atmósfera.

En la Figura 4.12 se observa que estos dos términos representan una salida de energía desde la superficie, siendo más importante el calor latente. En un promedio global para la Tierra, el flujo de calor hacia el suelo puede despreciarse.

Con respecto a la distribución de los componentes del balance de energía en el espacio, los flujos sobre los continentes tienen una distribución distinta a la de los flujos sobre los océanos. La pérdida de calor por evaporación es máxima en las zonas oceánicas tropicales y subtropicales. Sobre los continentes el flujo de calor latente es mayor en las regiones cálidas y húmedas, y mínimo en las zonas áridas y en latitudes altas.

El mayor intercambio de calor sensible tiene lugar en los desiertos tropicales. En contraste con el calor latente, el flujo de calor sensible es generalmente débil sobre los océanos, alcanzando los máximos valores en las zonas de corrientes cálidas. También se dan valores negativos (transporte hacia el océano) allí donde las masas de aire cálidas procedentes de los continentes alcanzan las corrientes frías.

#### 4.6.4 Transporte horizontal de calor

Aunque el balance de radiación sea positivo o negativo en determinados momentos y lugares, se observa que el planeta no se está calentando ni enfriando constantemente, sino que en promedio conservan un equilibrio térmico. Estas consideraciones indican que durante un período de tiempo largo, el nivel medio de energía calorífica del sistema en conjunto permanece constante.

Se observa en el planeta zonas donde la radiación neta del sistema es positiva (entre 35°S y 40°N) y zonas donde es negativa (Figura 4.13). Dado que los trópicos no se calientan ni las latitudes altas se enfrían de un modo progresivo, debe producirse constantemente una redistribución de energía térmica en el mundo, en forma de un movimiento continuo de energía desde los trópicos hacia los polos de manera que se mantenga el equilibrio calórico del sistema. De esta forma los trópicos ceden su exceso de calor y los polos no alcanzan condiciones de frío extremo. De no ser así se alcanzaría un equilibrio en el cual el ecuador estaría 14°C más cálido y el polo norte 25°C más frío de lo que son ahora.

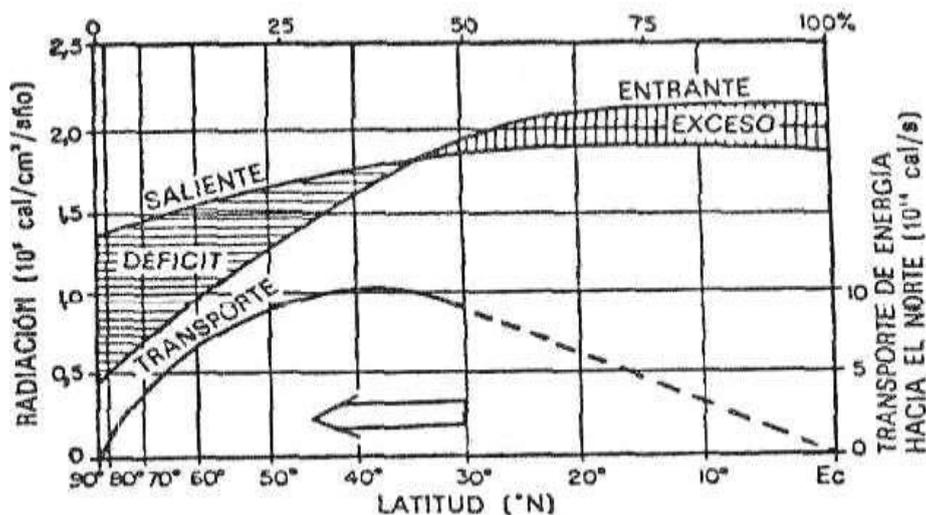


Figura 4.13: Transporte meridional de energía.

Este transporte de calor hacia los polos es realizado por medio de la atmósfera y los océanos y se estima que la primera transporta aproximadamente un 80% del total. El transporte horizontal (**advección**) tiene lugar tanto en forma de calor latente (es decir vapor de agua que se condensa) como de calor sensible (es decir masas de aire caliente).

La intensidad del flujo de energía hacia los polos está estrechamente ligada al gradiente meridiano (es decir, de Norte a Sur) de temperatura. En invierno, este gradiente de temperatura es máximo y, por consiguiente, también lo es la circulación de aire.

#### 4.7 RESUMEN

- Para todos los cálculos prácticos, la única fuente de energía calorífica de la superficie terrestre es el Sol.
- La energía solar es interceptada por el planeta, aumentando el nivel de energía. Al mismo tiempo la Tierra irradia energía hacia el espacio, proceso que tiende a disminuir el nivel de energía.
- Estos procesos de entrada y salida de energía están continuamente en acción, pudiéndose calcular un balance de radiación durante un período de tiempo determinado.
- Las variaciones diurnas y anuales del balance de radiación van acompañadas de una "utilización" de esa energía en la ejecución de otros procesos como el calentamiento del aire o del suelo, evaporación, transpiración o fotosíntesis. La forma en que la energía disponible es "invertida" en los distintos procesos corresponde a casos totalmente particulares, dependiendo de las condiciones locales del lugar, además del período de tiempo que se considere.
- Los movimientos turbulentos son los encargados de transferir parte de la energía de la Tierra hacia la atmósfera, de manera que las variaciones en los niveles de radiación neta determinarán los niveles de temperatura del aire.
- El calentamiento del suelo, mediante el proceso de conducción, dependerá también de la disponibilidad de energía en la superficie y de las características distintivas de cada superficie.
- Una parte importante del balance terrestre de calor la constituye el almacenamiento de energía como calor latente.
- El movimiento del agua a través de la atmósfera, océanos y continentes constituye un sistema de igual importancia al del flujo de radiación y las actividades de ambos sistemas están íntimamente relacionadas.
- En nuestro planeta los movimientos de la atmósfera y los océanos actúan como mecanismos de transporte de calor. Así pues, un estudio del balance de calor de la Tierra no será completo hasta que se describan y expliquen los tipos de circulación global del aire y del agua, íntimamente relacionados.

#### 4.8 BIBLIOGRAFIA

- CAIMI, E. 1979. La energía radiante en la atmósfera. Ed. EUDEBA. Cuadernos. 65 pp.
- GEIGER, R. 1965. The climate near the ground. Harvard University Press. Cambridge, Mass.
- LANDSBERG, H. 1969. Physical climatology. 3r. ed. Gray Printing Company, inc. 446 pp.
- MONTEITH, J.L. AND M.H. UNSWORTH. 1990. Principles of environmental physics. 2nd. ed. Edward Arnold ed. 291 pp.
- ROBINSON, N. 1966. Solar radiation. N. Robinson (ed). Ed. Elsevier. 347 pp.
- ROSENBERG, N.J. 1974. The microclimate: the biological environment. Ed. J.Wiley & Sons. 315 pp.

## 5. CIRCULACION GENERAL DE LA ATMOSFERA

### 5.1. INTRODUCCION

El movimiento de las masas de aire atmosférico y las aguas oceánicas son los encargados de compensar el desequilibrio de energía térmica entre las latitudes tropicales y las polares. Se conoce con el nombre de "**circulación general de la atmósfera**" al promedio climático de los movimientos horizontales y verticales del aire, a escala global. La distribución de los vientos sobre la superficie terrestre está estrechamente vinculada a las variaciones de la presión atmosférica, consecuencia del desigual calentamiento de la superficie. Los movimientos del aire son además influenciados por la rotación de la Tierra y por factores geográficos.

### 5.2. LA CIRCULACIÓN IDEAL

El viento es el resultado de las diferencias de presión del aire; el aire fluye naturalmente de las zonas de mayor presión a las de menor presión. Como cualquier gas, el aire al calentarse tiende a expandirse, disminuyendo su densidad y la presión que ejerce sobre la superficie. Al enfriarse, ocurre el proceso inverso. Las diferencias de presión son entonces las fuerzas impulsoras del viento; el motor que las genera es la radiación solar. A medida que la superficie se calienta desigualmente, el aire se mueve intentando balancear estas desigualdades.

Si no existiera la rotación terrestre, el movimiento del aire tomaría la forma de una gran celda de convección en cada hemisferio, como se muestra en la figura 5.1. El aire se calentaría y ascendería en la región ecuatorial y se enfriaría y descendería en las regiones polares. El aire polar al desplazarse sobre la superficie hacia el ecuador se iría calentando para volver a ascender, mientras que en los niveles altos de la atmósfera el aire ecuatorial se iría enfriando al aproximarse a los polos para volver a descender. Hadley, en 1735, fue el primero en proponer este esquema de circulación, conocido con el nombre de "**celda de Hadley**".

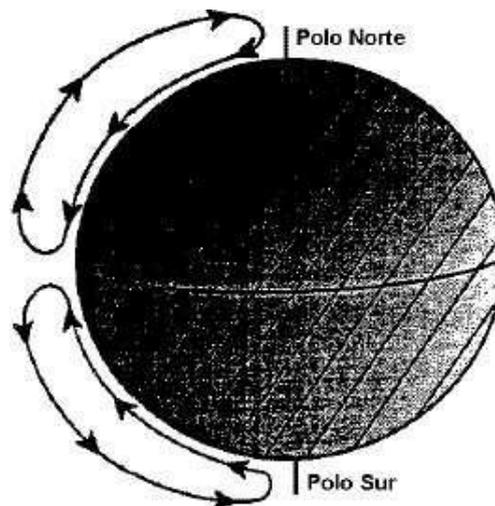


Figura 5.1. Esquema teórico de circulación propuesto por Hadley.

Mientras las masas de aire se mueven sobre la Tierra, esta a su vez realiza su movimiento de rotación. Un observador sobre la superficie de la Tierra vería a la masa de aire desviándose de su trayectoria, como si estuviera impulsada por una fuerza imaginaria. Esa fuerza desviadora imaginaria recibe el nombre de **fuerza de Coriolis**.

Este efecto puede apreciarse claramente si se intenta trazar una línea recta en un disco que se encuentre girando. La desviación que se produce en el trazo es análoga a lo que le ocurre al aire. Como resultado de esta fuerza, cuando el aire se desplaza en sentido longitudinal, se desvía hacia la izquierda de su trayectoria en el hemisferio sur y hacia la derecha en el hemisferio norte. La magnitud de la desviación es cada vez más mayor cuanto más alejado se esté del ecuador.

En la figura 5.2 se presenta la circulación global idealizada para la Tierra en rotación. Como consecuencia de la fuerza de Coriolis, el esquema propuesto por Hadley sólo se cumple entre el ecuador y unos 30° de latitud en ambos hemisferios. La **celda de Hadley** se dice que es una celda de circulación directa, porque el aire caliente (menos denso y más liviano) asciende en el ecuador y el aire más frío desciende en latitudes subtropicales. La celda de latitudes medias se denomina **celda de Ferrel**; es de circulación indirecta ya que el aire que desciende en la región subtropical es relativamente más cálido que el que asciende en latitudes altas, cerca de los 60° de latitud en ambos hemisferios. Entre los 60° y los polos existe otra celda de circulación directa, llamada **celda polar**. Las observaciones del movimiento atmosférico han establecido claramente la existencia de la celda de Hadley, ya que es la mejor desarrollada de las tres. Las otras dos son difíciles de observar si uno traza los campos de circulación de la atmósfera día a día, pues las latitudes altas, y sobre todo las medias, se caracterizan por la gran variabilidad de las condiciones del tiempo, pero se encuentran al construir los campos promedio de la circulación.

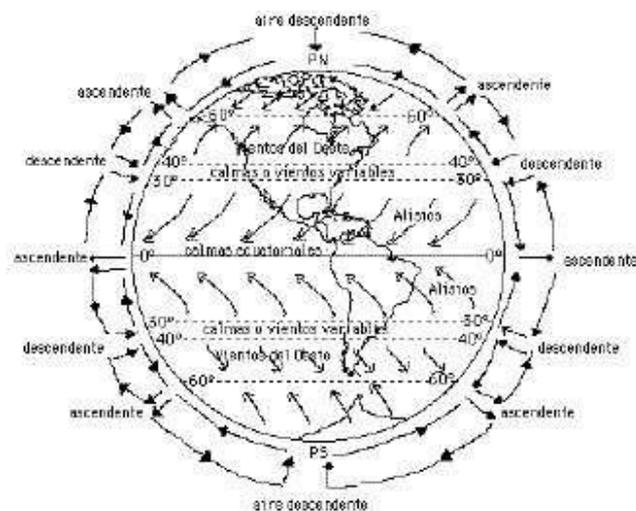


Figura 5.2. Esquema teórico de circulación para la Tierra en rotación.

### 5.3. LOS SISTEMAS TEÓRICOS DE PRESION Y VIENTO

En la figura 5.2., además de las celdas, están esquematizados los sistemas teóricos de presión y viento en la superficie terrestre. La circulación en superficie de ambas celdas de Hadley es desviada por la fuerza de Coriolis hacia el oeste en ambos hemisferios, dando forma a los **vientos alisios**. En el hemisferio sur los alisios soplan desde el sudeste y en el hemisferio norte desde el noreste. Estos fueron aprovechados por los navegantes europeos para dirigir sus naves a vela hacia el Nuevo Mundo.

Los alisios de ambos hemisferios convergen en una franja cerca del ecuador, la que se conoce con el nombre de "**zona de convergencia intertropical**" (ZCIT). Esta se caracteriza por movimientos ascendentes de masas de aire húmedo, lo que da origen a nubes convectivas y abundantes e intensas precipitaciones.

Alrededor de los 30° de latitud coinciden las ramas descendentes de las celdas de Hadley y de Ferrel. El descenso o subsidencia casi permanente de aire mantiene alta la presión, siendo esta región conocida como el "cinturón de **anticiclones subtropicales**". Allí los vientos son muy débiles o calmos, además el aire desciende seco, por lo tanto la humedad relativa es muy baja y los cielos permanecen despejados. Los conquistadores llamaban a esta región "latitud de los caballos", pues la ausencia de viento los mantenía casi detenidos durante varios días y se veían forzados a arrojar los caballos al mar para ahorrar agua y comida.

Entre los 30 y 60° el flujo hacia los polos es desviado por la fuerza de Coriolis hacia el oeste, dando lugar a la región de los **vientos del oeste**. Los oestes son mucho más esporádicos e inciertos que los alisios, pues el flujo medio se halla perturbado por la incesante migración de sistemas de baja y alta presión, causando desde la gran variabilidad del estado del tiempo en estas latitudes.

Alrededor de los 60° de latitud se ubica otra franja de bajas presiones, **las bajas subpolares**. En ella convergen el aire frío proveniente de las regiones polares con el aire más cálido de la zona subtropical. La separación entre estos dos tipos de masas de aire da origen al **frente polar**, que no es otra cosa que una sucesión de centros de baja presión asociados a frentes fríos y calientes que continuamente irrumpen en la región de los oestes.

La circulación en las latitudes más altas es relativamente poco conocida. Se sabe que la subsidencia en los polos da origen a centros de alta presión (**altas polares**) desde donde el aire fluye hacia el ecuador, siendo desviado por la fuerza de Coriolis y dando lugar a los **estes polares**.

#### 5.4. VIENTO GEOSTROFICO Y VIENTO GRADIENTE

Las observaciones realizadas en la atmósfera libre (llamamos así al aire que no está afectado por la fricción con la superficie terrestre, más allá de los 500 o 1000 m de altura), indican que el viento no se dirige de las altas a las bajas presiones, atravesando las isobaras, sino que se mueve paralelo a éstas, dejando las altas presiones a la izquierda y las bajas presiones a la derecha, como se muestra en la figura 5.3. Esta relación es propia del hemisferio sur, siendo inversa en el hemisferio norte. Cuando las isobaras son rectilíneas y paralelas entre sí, las fuerzas de presión y de Coriolis actúan en la misma dirección y sentidos opuestos, equilibrándose. El viento que cumple esta condición se llama "**viento geostrófico**".

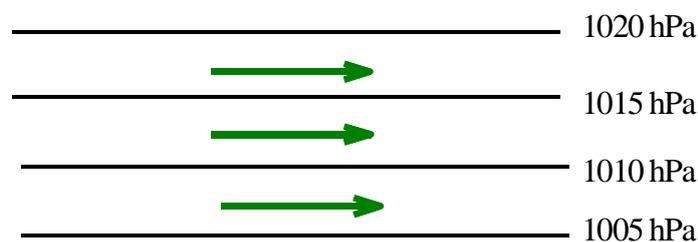


Figura 5.3. Dirección del viento entre isobaras paralelas en el hemisferio sur.

Cuando las isobaras tienen curvatura (como alrededor de un centro de alta o baja presión) el aire también se mueve paralelo a ellas siguiendo una trayectoria curvada (figura 5.4). Esos casos, además de las fuerzas de presión y de Coriolis, actúa una fuerza centrífuga. El viento resultante del nuevo equilibrio de fuerzas recibe el nombre de "**viento gradiente**".

El viento geostrófico y el viento gradiente son vientos teóricos que se pueden calcular a partir de consideraciones físicas y matemáticas. No obstante, los valores calculados a partir de los 1000 m de altura se asemejan muchos a los valores reales.

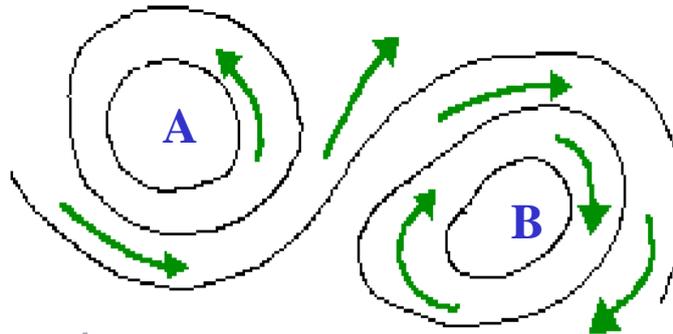


Figura 3.4. Trayectorias del viento alrededor de centros de alta y baja presión, en el hemisferio sur.

### 3.5. LA CIRCULACIÓN OBSERVADA

Hasta aquí hemos considerado que los sistemas de presión en superficie son cinturones continuos alrededor de la Tierra. Sin embargo, la única región del planeta donde esto ocurre es en la baja subpolar del hemisferio sur, que rodea al continente antártico. La razón por la que esto ocurre es que es el único lugar donde los océanos son continuos alrededor del globo. La desigual distribución de océanos y tierra es otra causa del calentamiento diferencial de la superficie y, por lo tanto, de la distribución observada de la presión y el viento.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran la distribución de la presión media a nivel del mar para los meses de enero y julio, respectivamente. Notar en estos mapas que la mayoría de los sistemas de presión no son cinturones que rodean el globo, sino que aparecen como células aisladas. Lo más destacado son los anticiclones subtropicales, sistemas centrados entre 25 y 30 grados de latitud sobre los grandes océanos que permanecen durante todo el año. También vemos que otros sistemas no son permanentes sino estacionales y que los cambios estacionales son mucho mayores en el hemisferio norte que en el sur, hecho que se atribuye a la desigual distribución de tierras y océanos en ambos hemisferios.

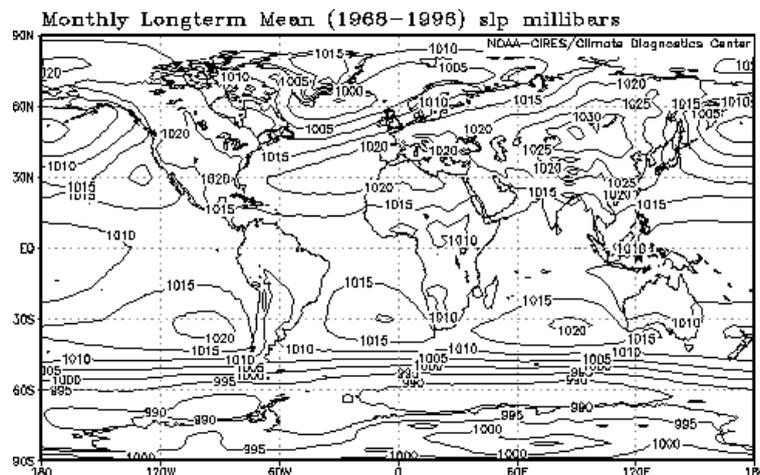


Figura 5.5. Distribución global de la presión media a nivel del mar en el mes de **enero**.

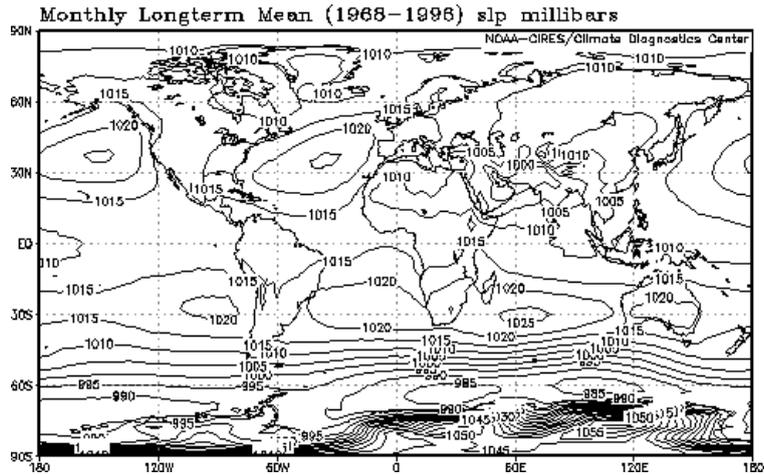


Figura 5.6. Distribución global de la presión media a nivel del mar en el mes de **julio**.

Asociada a la distribución de la presión se encuentran los campos de viento, que se representan en las figuras 5.7 y 5.8 para los meses de enero y julio, respectivamente. Aunque estos diagramas están muy simplificados, sirven para ilustrar la relación entre la distribución de los sistemas de presión y la circulación atmosférica. Se puede observar claramente cómo los anticiclones subtropicales son los que dominan al flujo del aire en latitudes bajas y medias (observar el giro antihorario del viento alrededor de los anticiclones en el hemisferio sur y en sentido horario en el hemisferio norte). También se pueden ver los cambios estacionales del flujo asociados al desplazamiento de los anticiclones. Otra característica notable es la circulación predominante del oeste en latitudes medias del hemisferio sur y el contraste con lo que ocurre en el hemisferio norte.

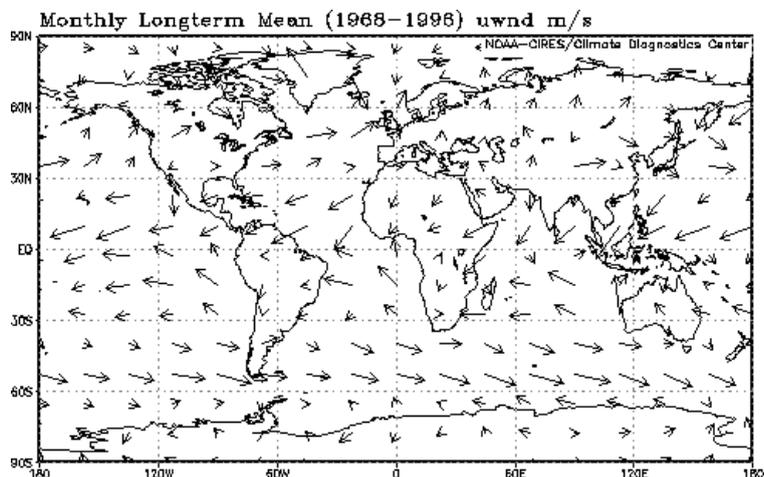


Figura 5.7. Distribución media del viento en superficie en el mes de **enero**.

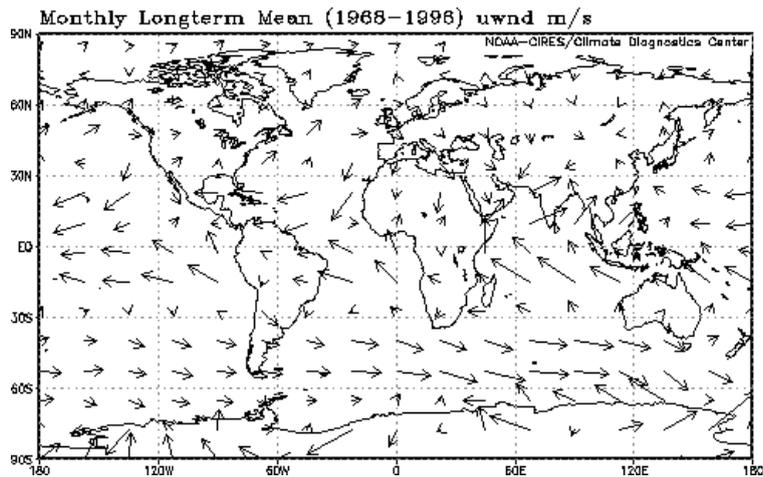


Figura 5.8. Distribución media del viento en superficie en el mes de julio.

## 5.6. LAS CORRIENTES OCEANICAS

Las corrientes oceánicas desempeñan un papel importante en la redistribución de la energía térmica sobre la superficie de la Tierra y ejercen su influencia en el clima de los continentes adyacentes. Las grandes corrientes que surcan los océanos se originan por diferencias de densidad en el agua y por la acción de los vientos predominantes sobre la superficie del agua. La densidad del agua de mar varía con la temperatura y con la salinidad; los procesos que involucran a estos dos factores se denominan **procesos termohalinos**. Las principales corrientes oceánicas reflejan una conjunción de efectos termohalinos y de arrastre por la acción del viento. Sin embargo, de ambos efectos, el viento es el que tiene mayor efecto en la circulación de las aguas superficiales, y los procesos termohalinos dominan las corrientes de aguas profundas y los movimientos verticales del agua.

En consecuencia, las corrientes superficiales en los océanos siguen un patrón similar al de la circulación atmosférica. En la figura 5.9 puede verse esa notable similitud, principalmente en la circulación alrededor de los anticiclones en cada una de las cuencas oceánicas. En el flanco oriental de estos sistemas, las corrientes llevan aguas frías desde latitudes altas hacia el ecuador, siguiendo una trayectoria paralela al borde de los continentes. En el flanco occidental, las corrientes transportan aguas cálidas hacia latitudes polares. Esta configuración condiciona la temperatura encontrada en los continentes, generando diferencias térmicas entre costas opuestas.

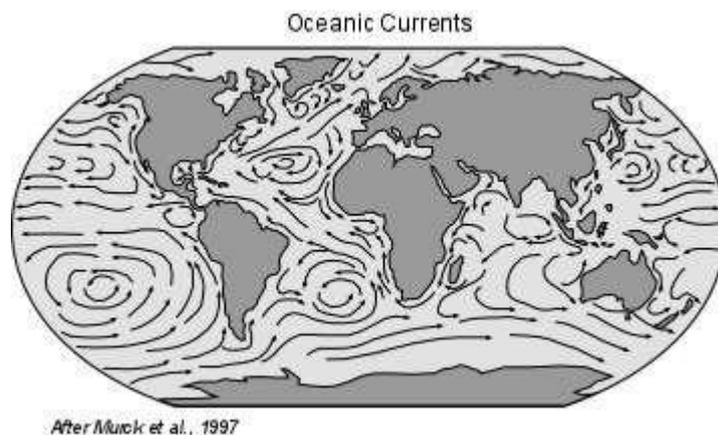


Figura 5.9. Trayectoria de las principales corrientes oceánicas.

## **5.8. BIBLIOGRAFIA**

BARRY, R.G. y CHORLEY, R.J., 1972. *Atmósfera, tiempo y clima*. Ediciones Omega, Barcelona, España. 500 pp.

CELEMIN, A.H. 1984. *Meteorología Práctica*. Edición del Autor. Mar del Plata, Argentina. 314 pp.

## 6 TEMPERATURA

### 6.1 TEMPERATURA DEL SUELO

#### 6.1.1 Introducción

El suelo con su capacidad de absorber radiación de onda corta transformándola en energía calórica constituye la puerta de entrada de la energía que mueve los mecanismos de los procesos meteorológicos.

El aire, cuyo poder de absorción de radiación solar es pequeño, no se calienta por sí mismo sino gracias al calor que le cede el suelo. Es por eso que la temperatura del aire va a depender del estado térmico del suelo.

Desde el punto de vista agrícola la temperatura del suelo es de considerable importancia, ya que influye sobre diferentes etapas de un vegetal, tales como: la germinación, la actividad funcional de las raíces, la velocidad y duración del crecimiento de las plantas, y la ocurrencia o severidad de enfermedades.

El proceso de germinación depende de la temperatura del suelo más que de la del aire así como la eficiencia de la absorción de los nutrientes, siempre y cuando haya humedad adecuada en el suelo. De la misma forma, determinados microorganismos como los fijadores de nitrógeno, dependen también de la temperatura del suelo disminuyendo mucho su actividad por debajo de los 10 °C la que aumenta hasta determinados límites, con el incremento de la temperatura.

#### 6.1.2 Comportamiento de la temperatura del suelo

Dado que el balance de radiación diurno es positivo y el nocturno negativo, el suelo presenta una variación diaria de temperatura en superficie, cuya amplitud suele ser mucho mayor que la de la temperatura del aire. Existe además una variación o marcha anual de la temperatura del suelo, que se debe a los procesos alternados de calentamiento y enfriamiento que se producen a lo largo del año a consecuencia de la variación anual de la radiación neta. Considerando la marcha diaria de la temperatura en superficie se observa que, normalmente, el mínimo de temperatura se produce en el momento de la salida del sol, y la máxima después del mediodía. En el caso de la marcha anual, el máximo tiene lugar un poco después del solsticio de verano y el mínimo un poco después del solsticio de invierno.

Estas variaciones anuales y diurnas de temperatura están directamente relacionadas, como se ha dicho, con el balance local de radiación. En casi todas las latitudes, la ganancia de energía supera a las pérdidas desde aproximadamente una hora después de la salida del Sol hasta algunas horas después del mediodía, provocando el incremento de la temperatura hasta alcanzar la máxima cuando la diferencia entre ambos términos es nula. A partir de ese momento las pérdidas son mayores que las ganancias, (el balance es negativo), hasta poco después de la salida del Sol en que se produce la mínima como consecuencia de la acumulación de sucesivas pérdidas netas de energía (figura 6.4). Idénticas consideraciones pueden efectuarse para explicar la marcha anual.

#### 6.1.3 Leyes de Angot

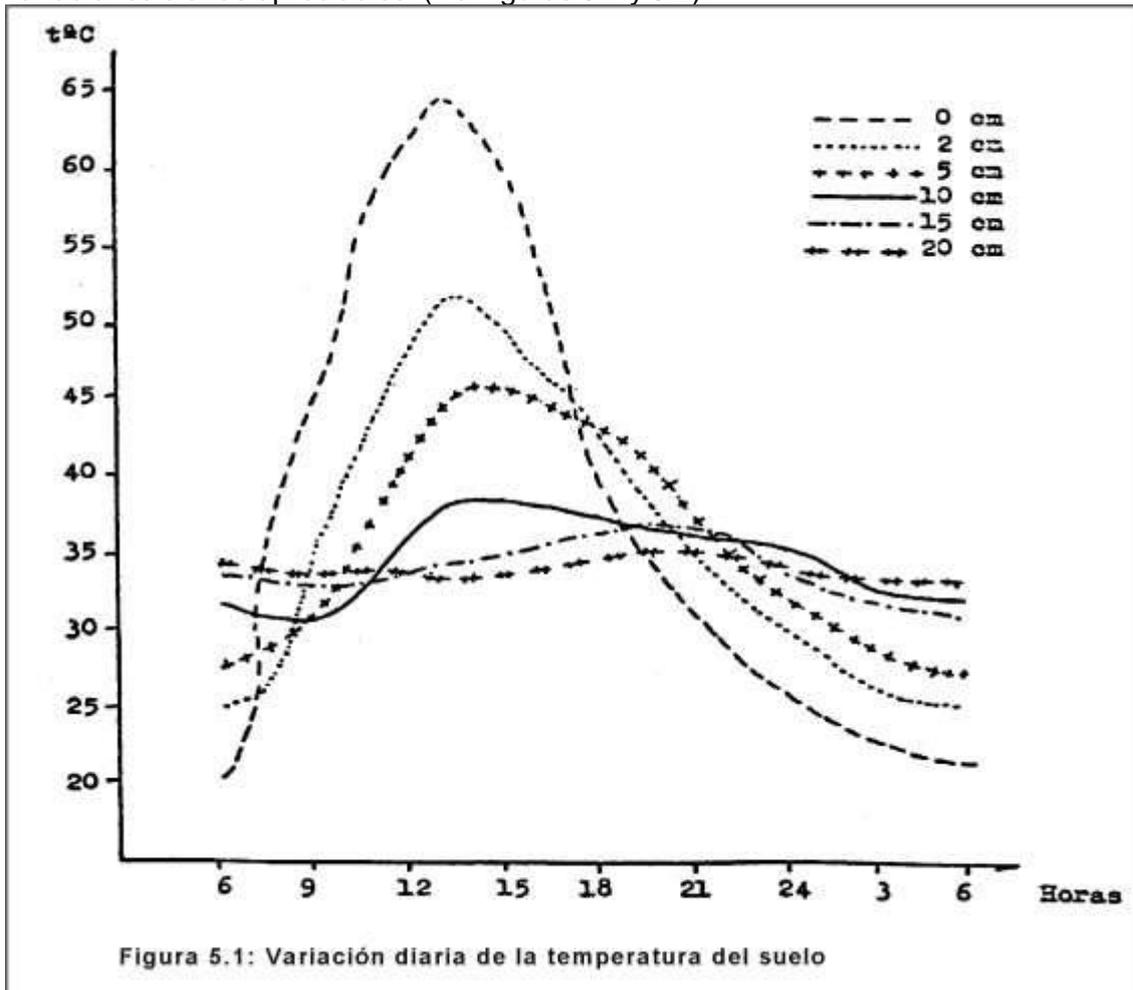
- **Primera ley:** Se refiere a la disminución de la amplitud térmica a medida que aumenta la profundidad de observación.

**“La amplitud de las oscilaciones de la temperatura del suelo disminuye geoméricamente a medida que la profundidad aumenta aritméticamente”.**

Supongamos una oscilación diaria de la temperatura cuya amplitud es de 12°C en superficie, y que a una profundidad de 9 cm, dicha amplitud se reduce a la mitad, o sea a 6°C. A una profundidad doble 18 cm, triple 27 cm, cuádruple 36 cm, etc., será:

Profundidad	Amplitud	Profundidad	Amplitud
0 cm	$12/2^0 = 12^\circ\text{C}$	36 cm	$12/2^4 = 0.75^\circ\text{C}$
9 cm	$12/2^1 = 6^\circ\text{C}$	45 cm	$12/2^5 = 0.37^\circ\text{C}$
18 cm	$12/2^2 = 3^\circ\text{C}$	54 cm	$12/2^6 = 0.19^\circ\text{C}$
27 cm	$12/2^3 = 1.5^\circ\text{C}$	63 cm	$12/2^7 = 0.^\circ\text{C}$

Se aprecia que a una profundidad de 63 cm el valor resultante es despreciable en la práctica. Se comprueba como consecuencia de la primera ley, que la marcha diaria de la temperatura subsiste hasta una cierta profundidad. Por debajo de esa profundidad, las únicas variaciones son las debidas a la marcha anual de la temperatura, no existiendo variaciones diarias apreciables. (Ver figuras 6.1 y 6.2).



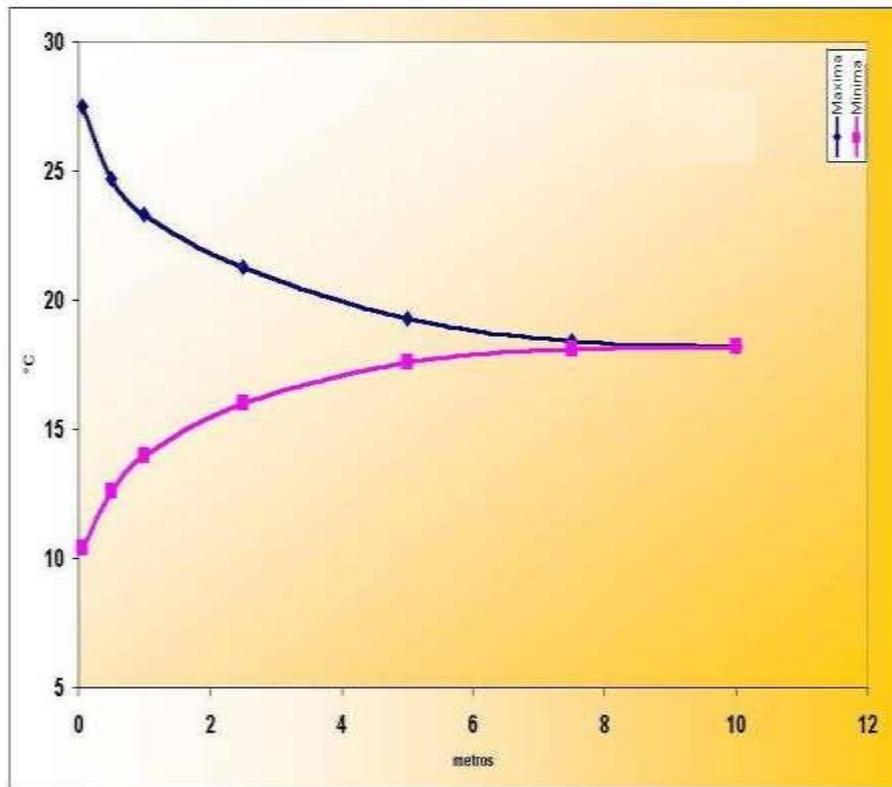


Figura 6.2: primera Ley de Argot.

La marcha anual se registra hasta una profundidad mucho mayor, aproximadamente 10 m para Buenos Aires, debajo de la cual ya no se registran variaciones de temperatura. Dicha profundidad recibe el nombre de **cota isotérmica** y presenta una temperatura invariable a lo largo del año, que es muy similar a la temperatura media del aire.

- **Segunda Ley:** Se refiere al atraso que se produce en el momento de ocurrencia de los valores extremos de la temperatura a medida que aumenta la profundidad de observación.

**"El atraso en el momento de ocurrencia de las temperaturas máximas y mínimas es, en un suelo homogéneo, proporcional a la profundidad".**

(Figura 6.3)

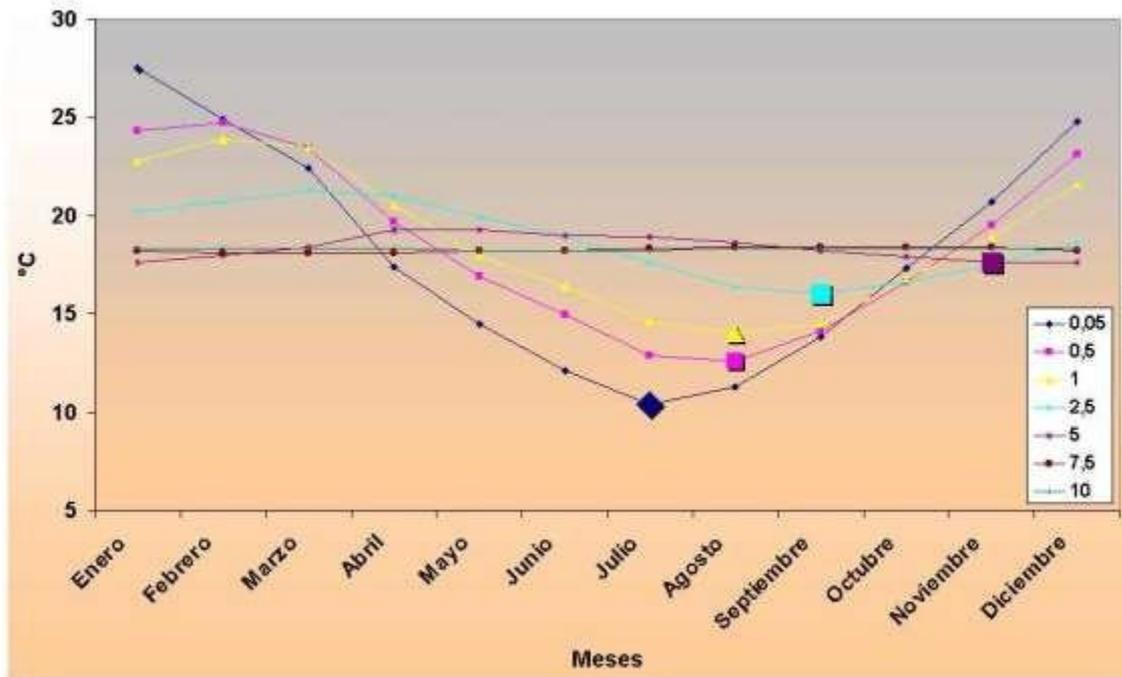


Figura 6.3: segunda ley de Angot.

La profundidad de la cota isotérmica depende de la naturaleza del suelo y de la amplitud de la marcha anual de la temperatura en superficie. En latitudes medias se encuentra a una profundidad de aproximadamente 10 m, mientras que en zonas tropicales, donde la amplitud térmica es muy pequeña, puede estar a sólo 2 m. En localidades situadas a altas latitudes alcanza el extremo inferior, hallándose a más de 20 m.

Por debajo de la cota isotérmica la temperatura crece regularmente a medida que aumenta la profundidad, a razón de 1°C cada 33 m, debido al flujo de calor que asciende desde el centro incandescente de la Tierra.

#### 6.1.4 Transporte de calor en el suelo

Las leyes de Angot brindan una descripción de las marchas diaria y anual de la temperatura del suelo en función de la profundidad, pero nada dicen acerca de las causas que determinan las peculiaridades de las mismas.

Para esto se deben considerar algunos aspectos que regulan el transporte de calor en el suelo, ya que toda variación de temperatura se debe a un cambio en el contenido calórico de la partícula de suelo en cuestión. Dichos cambios en las distintas capas del suelo obedecen a la existencia de flujos calóricos que se desplazan, por conducción, de capas más calientes a las más frías, efectuando el transporte de la energía solar absorbida en la superficie hacia las capas más profundas. Cuando el balance calórico de la superficie es negativo, en el invierno o durante la noche, esta situación se invierte, siendo las capas más profundas las que envían el calor hacia la superficie más fría, contribuyendo a atenuar el descenso térmico.

El flujo calórico será tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia que existe entre las temperaturas de las capas de suelo que se consideran y tanto menor cuanto mayor sea la distancia entre las mismas. A igualdad de gradientes térmicos no todos los suelos presentarán el mismo flujo calórico, siendo unos mejores conductores que otros. El flujo de calor de un suelo estará determinado entonces por el gradiente de temperatura y la conductividad térmica o calórica.

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx}$$

Q : calor que se transfiere por unidad de tiempo y de área  
 T : temperatura  
 x : profundidad del suelo  
 $\lambda$  : coeficiente de conductividad calórica

La **conductividad calórica** ( $\lambda$ ) de una sustancia es la cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo y de área a través de un espesor unitario cuando es mantenida una diferencia de temperatura de 1°C. Sus unidades son en consecuencia  $\text{cal cm}^{-1} \text{seg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ .

Permaneciendo los otros factores constantes, cuanto mayor sea la conductividad calórica del suelo, menores serán las variaciones de la temperatura de la superficie y más efectivo su papel como reservorio de calor.

La conductividad calórica del suelo está determinada primariamente por su porosidad, humedad y contenido de materia orgánica. En condiciones naturales, los suelos pesados, generalmente tienen un contenido de humedad mayor, lo que aumenta mucho su conductividad. La materia orgánica no transfiere el calor tan rápidamente como un suelo mineral. En el cuadro que se muestra a continuación pueden verse los coeficientes de conductividad calórica de algunos componentes del suelo, algunos de ellos variables, como el humus, agua y aire, y por lo tanto capaces de modificar la conductividad del conjunto.

Sustancias	Conductividad térmica Cal/cm.seg.°C
Feldespatos	0.0058
Calcáreos	0.0040
Humus	0.0030
Agua	0.0015
Aire	0.00001

Mientras que la velocidad a la cual el calor es transferido en un cuerpo depende de la conductividad calórica de la sustancia, el aumento de temperatura que este calor producirá variará con su **capacidad calorífica**. La **capacidad calorífica (Cv)** es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 cm<sup>3</sup> de una sustancia en 1°C y deriva del producto del calor específico del suelo por su densidad aparente por lo que a veces es denominado "**calor específico volumétrico**".

Varía con el contenido de humedad del suelo, pues el agua es el componente del mismo que tiene la mayor capacidad calorífica (1 cal cm<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup>). En estado seco, los suelos orgánicos tienen una capacidad calorífica más baja que los minerales, debido a la baja densidad de los primeros. Sin embargo los suelos orgánicos y de textura fina, debido a su alta capacidad de retener agua, tienen generalmente mayor capacidad calorífica que los suelos de textura gruesa y presentan menores amplitudes térmicas. En la mayoría de los suelos varía entre 0,3 a 0,6 cal cm<sup>-3</sup>°C<sup>-1</sup>.

La cobertura vegetal por árboles, arbustos o plantas herbáceas o por paja u otros desechos o materiales, el laboreo del suelo, el riego, el drenaje, la remoción de malezas etc. son todas causas que modifican el comportamiento calórico y térmico del suelo a través de la alteración de una o más de las variables analizadas precedentemente.

## 6.2 TEMPERATURA DEL AIRE

### 6.2.1 Introducción

El cambio del estado térmico en las capas inferiores de la atmósfera se halla en relación directa con los cambios del estado térmico de la superficie terrestre, sólida o líquida y sólo en muy pequeña parte depende de la absorción directa de la radiación solar.

Dado que la atmósfera tiene muy poca capacidad de absorber dicha radiación, es por medio de la superficie terrestre que recibe la mayor parte de la energía calórica que luego envía hacia las capas inferiores del suelo, por el proceso de conducción, y hacia las capas de la atmósfera, mediante los procesos de conducción, radiación, convección, advección y turbulencia..

**Conducción:** La baja conductibilidad calórica del aire, unida a la lentitud inherente al proceso de conducción haría que no se registraran variaciones diarias de temperatura más que hasta unos pocos centímetros de altura sobre el suelo si este fuera el único proceso interviniente.

**Radiación:** Si bien la atmósfera no modifica su temperatura por la radiación solar (de onda corta), si lo hace con la radiación terrestre (de onda larga), debido a dos de sus componentes más importantes: el vapor de agua y el dióxido de carbono.

**Advección:** Es el transporte de calor por masas de aire que se desplazan en sentido horizontal.

**Convección:** Es el proceso de traslado de grandes masas de aire en sentido vertical, transportando calor.

**Turbulencia:** Es un movimiento irregular debido a pequeños remolinos superpuestos a la corriente general, que se desplazan con la misma. Al pasar de un lugar a otro estos remolinos también transportan el calor.

Como puede apreciarse, en el calentamiento del aire intervienen dos tipos de procesos; el primero de ellos, que comprende la conducción y radiación, se caracteriza por un transporte de calor de un nivel térmico mayor a otro menor sin que se produzca desplazamiento de materia, dependiendo de la existencia de un gradiente térmico; el segundo comprende la advección, convección y turbulencia y se caracteriza porque en ellos el calor se transporta formando parte de una corriente de aire y dependiendo, principalmente, de la existencia de gradientes de presión antes que de gradientes térmicos. Este último grupo es el que posibilita las grandes variaciones diarias de temperatura en las capas bajas de la atmósfera.

### 6.2.2 Variaciones anuales y diurnas de la temperatura

Las variaciones anuales y diurnas de temperatura están directamente relacionadas con el balance local de radiación, por lo que todas las consideraciones efectuadas anteriormente para la superficie del suelo son también válidas para el aire, debiéndose tener en cuenta sólo un pequeño retraso en el momento de registro de las variaciones, motivado por el tiempo necesario para la transferencia de la onda térmica hasta la altura de observación de la temperatura del aire (figura 6.4).

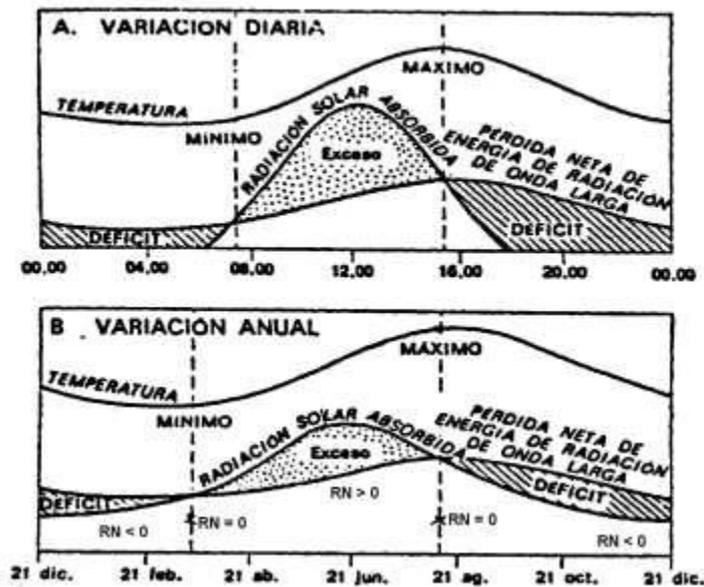


Figura 6.4: Variación diaria y anual de temperatura.

Exceptuando las regiones vecinas al Ecuador, donde la temperatura es prácticamente la misma en todas las épocas del año, en las restantes regiones de la Tierra la temperatura varía apreciablemente de acuerdo a las épocas del año, debido a las variaciones de la duración del día y de la inclinación de los rayos solares que llegan a la superficie terrestre. La marcha anual de la temperatura tiene una gran importancia, pues regula la vida sobre el planeta, tanto la de los vegetales y animales como la del hombre.

### 6.2.3 Amplitud anual y diaria de temperatura

La causa principal que determina la amplitud térmica anual es la latitud. En efecto, la cantidad de calorías recibidas por la superficie terrestre en un día de invierno y en un día de verano en las regiones polares es muy diferente; esa diferencia va disminuyendo hacia el ecuador, como puede apreciarse en el siguiente cuadro:

Localidad	Amplitud normal anual	Latitud aproximada
Asunción	9.5°	25° S
Paraná	11.9°	32° S
Patagones	15.1°	41° S
Trelew	16.1°	43° S

En general, en el país la amplitud anual es pequeña, siempre inferior a 20°, a consecuencia de la otra gran causa determinante de la amplitud térmica que es la oceanidad. Efectivamente, debido al elevado calor específico del agua, en comparación con el suelo, a la penetración de la radiación a mayor profundidad y a una muy eficiente redistribución del calor absorbido a consecuencia de los movimientos, los océanos tienen una elevada capacidad de almacenar energía sin elevar mucho su temperatura y de liberarla durante el invierno, por lo cual su amplitud térmica anual y la de las regiones vecinas es reducida con respecto a las regiones predominantemente continentales.

La característica oceánica del clima argentino determina que los cultivos no puedan llegar hasta las elevadas latitudes logradas en los países del hemisferio norte, debido a la suavidad de los veranos que no proveen las temperaturas necesarias para

permitir una adecuada maduración de los frutos o no tienen la duración adecuada para completar el ciclo de muchos cultivos, aunque por otra parte, los inviernos moderados posibilitan la cría de ganado a campo durante todo el año sin necesidad de suplementos alimentarios, ya que no se interrumpe el crecimiento de las especies invernales que servirán de forraje a los animales.

#### 6.2.4 Variación de la temperatura con la altura

En la atmósfera la temperatura disminuye con la altura aproximadamente  $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  hasta la tropopausa. Esta disminución no es constante para cada lugar, ya que depende principalmente del momento del día y de la época del año. Bajo ciertas condiciones, la temperatura del aire en lugar de disminuir con la altura, aumenta (figura 6.5). Esto puede ocurrir, en regiones llanas y en las noches despejadas y serenas, en un espesor variable, que va de unos centímetros a varios metros y se denomina **inversión térmica**. Ocurre que el suelo se enfría intensamente y, en consecuencia, también el aire que está en su contacto inmediato. Las capas que siguen sufren cada vez menos los efectos de ese enfriamiento y por lo tanto permanecen más calientes que el aire situado más abajo. También se producen inversiones térmicas en el fondo de los valles, donde se va acumulando el aire enfriado en contacto con las laderas de las montañas que, por ser más pesado, se desliza hacia las partes más bajas (ver figura 6.6)

Existen también inversiones en altura que pueden originarse por convergencia de masas de aire de diferente temperatura y densidad. Otras son causadas por procesos mecánicos como subsidencia (descenso del aire) y turbulencia. Estas inversiones producen importantes cambios en el tiempo.

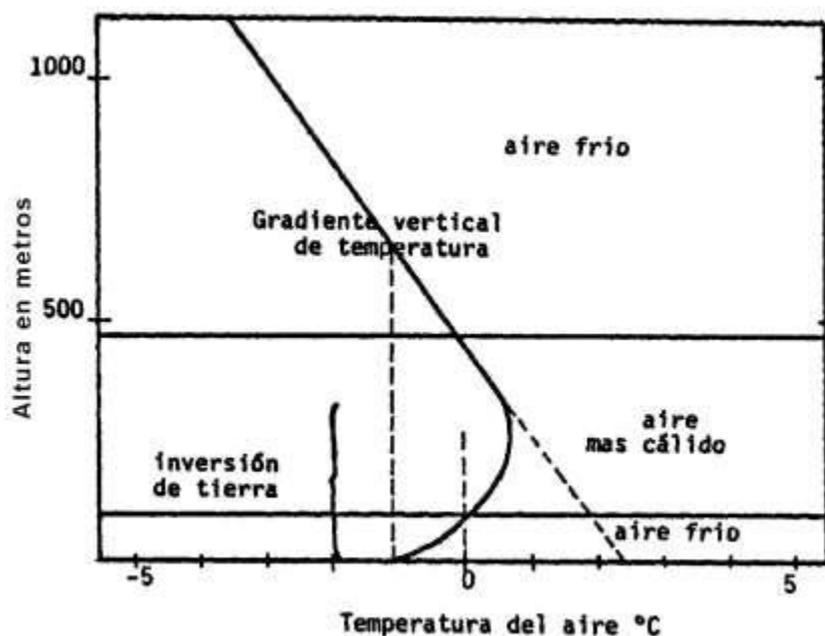


Figura 6.5: Inversión de temperatura en el nivel bajo, producida por la radiación nocturna.

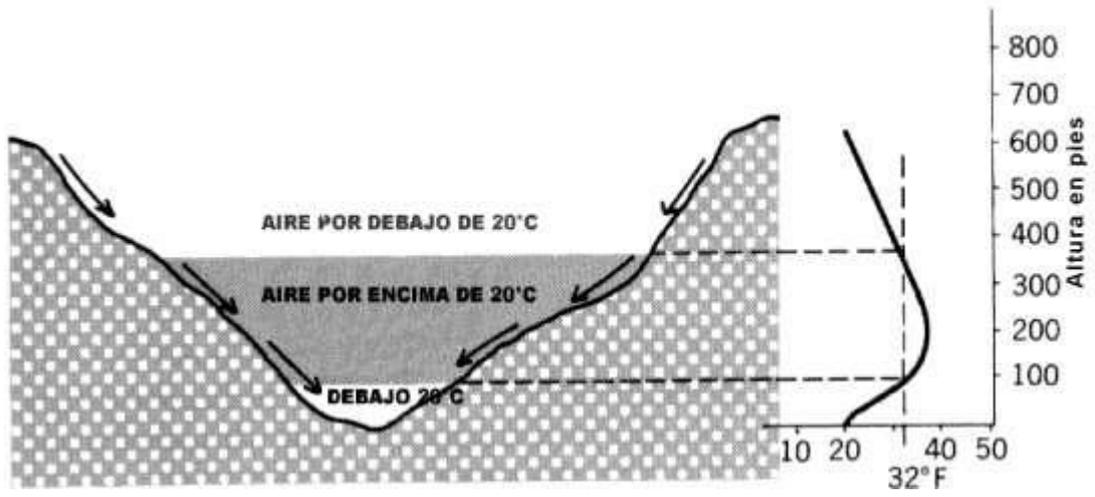


Figura 6.6: drenaje de aire en Valles.

## 8. CICLO HIDRLOGICO: Precipitación

### 8.1 Formación de la precipitación

La **precipitación** es el proceso encargado de la transferencia de humedad desde el aire hacia el suelo en forma líquida o sólida. Tiene lugar cuando las gotas de agua o partículas de hielo caen bajo la influencia de la gravedad. Este proceso está controlado por la temperatura y por el tamaño de las gotas de agua o cristales, que deben alcanzar un crecimiento suficiente como para superar las corrientes verticales ascendentes que ocurren en una nube. Así muchas veces las gotas se evaporan durante la caída antes de llegar a tierra. En nubes de gotas (que no contienen cristales de hielo) el proceso de condensación por sí solo no es efectivo en la producción de gotas de lluvia. En efecto, el tamaño de una gota de lluvia típica es 100 veces más grande que el de una gota de nube típica.

Existen diversas teorías que explican las diferentes formas en que las gotas de nubes crecen hasta alcanzar el tamaño de una gota de lluvia. Los dos grupos principales de teorías que actualmente tratan de explicar el rápido crecimiento de las gotas de lluvia suponen que el crecimiento de los cristales de hielo tiene lugar a expensas de las gotas de agua y que la unión de las pequeñas gotas de agua se produce por la acción de barrido de las gotas de mayor tamaño que caen o ascienden a diferente velocidad.

### 8.2 Tipos de precipitación

Se llama **llovizna** a la precipitación uniforme compuesta totalmente por gotitas menores a 0,5 mm de diámetro, de larga duración, proveniente de masas con poca humedad y nubes bajas y poco profundas. La **lluvia**, producida por nubes de varios kilómetros de espesor, consiste en gotas de mayor tamaño, de un radio superior a los 2 mm. Las lluvias más fuertes compuestas por gotas más grandes, proceden de nubes llamadas cúmulus, cuyo espesor puede llegar a los 10 km y que contienen fuertes corrientes ascendentes de varios metros por segundo. Las precipitaciones, denominadas **chaparrones** que producen estas nubes son esporádicas, porque son nubes de sólo unos pocos kilómetros de extensión horizontal. Son lluvias de poca duración (de 5 a 60 minutos) pero de mucha intensidad (5 a 200 mm) y se caracterizan por la repentina forma como comienzan y finalizan, y también por rápidos cambios en su intensidad.

Las partes más altas de un sistema de nubes que se extiende bien sobre el nivel de 0 °C contienen partículas de hielo. En nubes estratiformes estos cristales se agrupan en copos de nieve que caen a velocidades superiores a 1 m/s disolviéndose al cruzar el nivel de los 0°C o, en tiempo frío, llegan al suelo como **nieve**. Se pueden encontrar distintas variedades de nieve: aguanieve, nieve granulada, agujas de hielo, diferenciándose según la temperatura que existe en el ambiente. En nubes de chaparrones, las partículas de hielo generalmente se encuentran como piedras de **granizo** que a menudo alcanzan el suelo.

### 8.3 Tipos genéticos de precipitación

Las distintas causas que originan la elevación del aire y que permiten su enfriamiento y posterior condensación del vapor de agua, originan ciertas "formas" de nubes y su agrupamiento en determinados "sistemas". Se pueden establecer tres **causas de ascenso**, que tienen asociadas distintas características de la precipitación. Las tres no son mutuamente exclusivas, y cualquier tipo de partículas de precipitación no es necesariamente el resultado de solamente una. En realidad la mayor parte de las precipitaciones están causadas por la acción conjunta de varios tipos de ascenso.

#### 8.3.1 Precipitación convectiva.

Es la que se produce por el ascenso **convectivo** del aire. Todo el sistema convectivo consiste en numerosas celdas con corrientes ascendentes y descendentes; las nubes características son los cúmulus. Si el aire es muy húmedo e inestable, la liberación de calor latente de condensación puede ser tan grande que cause que estos cúmulus crezcan y se conviertan en profundos cumulonimbus. (Figura 8.1)

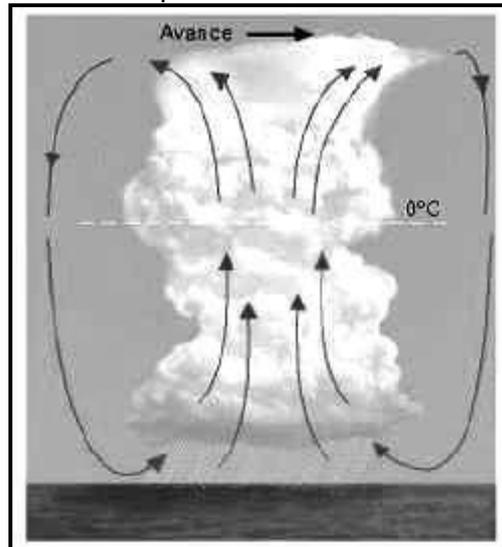


Figura 8.1: Esquema de la precipitación originada por la elevación convectiva de aire.

Aunque el fuerte calentamiento de la superficie puede provocar que una masa de aire se eleve y se inestabilice, en ciertos casos no es suficiente para inducir el ascenso y la posible precipitación. Aunque el aire sea inestable, es necesario que actúe algún otro mecanismo para "activar" la formación de corrientes convectivas. Por ejemplo, ascenso debido a un obstáculo en el terreno, por la fricción con la superficie del aire en movimiento o por el ascenso a lo largo de una superficie frontal. De esto se desprende que este tipo de precipitación tiene un origen complejo.

La precipitación asociada tiene características particulares. La lluvia se da en forma de "chaparrones" o "aguaceros", que son de corta duración pero abundantes y ocasionalmente pueden producir granizo. Ocurren principalmente sobre los continentes, y presentan una periodicidad estacional y diurna reflejando la influencia del calentamiento solar. Son más frecuentes en los meses de verano, y en las horas de la tarde, en que el aire está más caliente e inestable.

### 8.3.2 Precipitación orográfica.

Es la precipitación causada o intensificada por el ascenso forzado del aire que produce un obstáculo orográfico, como por ejemplo, una cadena montañosa. El total anual de precipitación en las zonas altas de montaña es mucho mayor que el de las tierras adyacentes.

Si una masa de aire en movimiento encuentra un obstáculo orográfico se eleva. Durante la elevación, al igual que en los demás tipos genéticos, se expande, se enfría y llegado al punto de saturación, comienza la condensación. Las gotitas de agua o cristales de nieve formados, según la temperatura existente, crecen progresivamente hasta que por su peso precipitan a tierra.

Las precipitaciones están ligadas a la configuración del terreno y su intensidad y forma varía según el estado de equilibrio de la masa de aire. Un ejemplo de este tipo de precipitación lo encontramos en el hemisferio sur, con las precipitaciones en el sur de Chile, donde masas de aire provenientes del Pacífico chocan contra la cordillera de los Andes (Figura 8.2). En nuestro país tienen lugar en el noroeste, donde se produce el ascenso de aire del noreste emitido por el anticiclón del Atlántico. A sotavento de estas

barreras montañosas donde se produce el descenso del aire, es característicamente seco.

Como puede esperarse, las precipitaciones orográficas tienen menos periodicidad estacional y diaria que las de origen convectivo, variando entre regiones. Sin embargo, características como la intensidad de los vientos, el ángulo con el cual encuentran la barrera montañosa y el grado de contraste entre la tierra y la temperatura del agua pueden determinar la estación de máxima precipitación orográfica.

Los tipos de nubes e intensidad de la precipitación y su extensión asociada con los efectos orográficos son altamente variables, como nieblas y neblinas, lloviznas y lluvias, o chaparrones y nevadas.

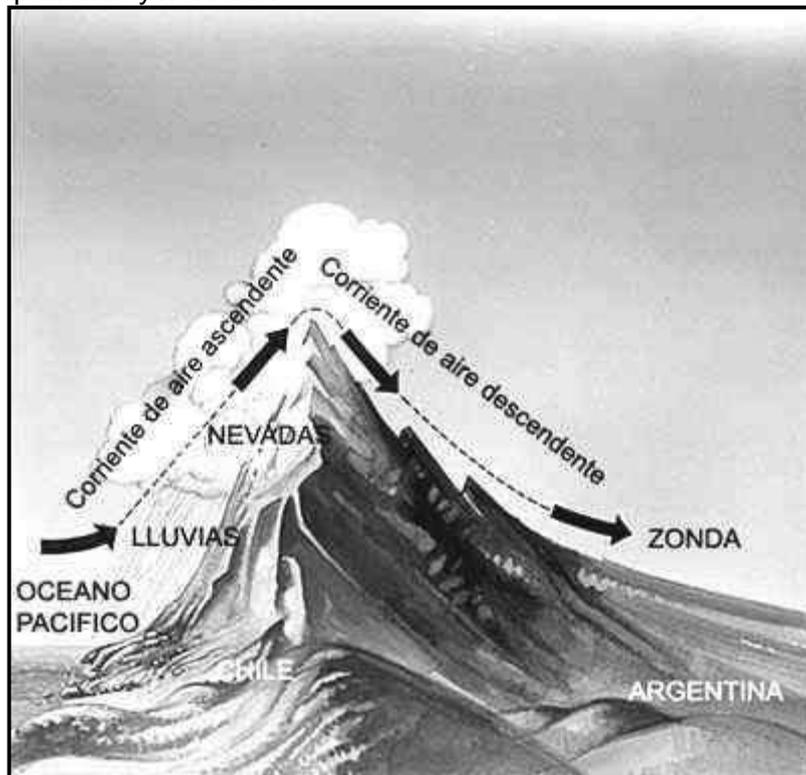


Figura 8.2: Precipitación de origen orográfico

### 8.3.3 Precipitaciones frontales y ciclónicas

Son las precipitaciones que se producen en la zona de encuentro de dos masas de aire de diferentes características térmicas y de humedad. Son muy comunes en latitudes medias. Las nubes de los sistemas frontales, así como la precipitación asociada no están fijados totalmente. Si el ascenso de aire es lento y el aire es además estable, como suele ocurrir en los frentes cálidos, el enfriamiento puede llegar a ser lento, y las nubes que resulten de él serán del tipo stratus, originando una lluvia extensa y continua. Pero si el equilibrio de la atmósfera es inestable un leve ascenso a lo largo de la superficie frontal puede originar nubes de tipo cúmulus y precipitaciones en forma de chaparrones y chubascos, típicos de los frentes fríos. (Figura 8.3)

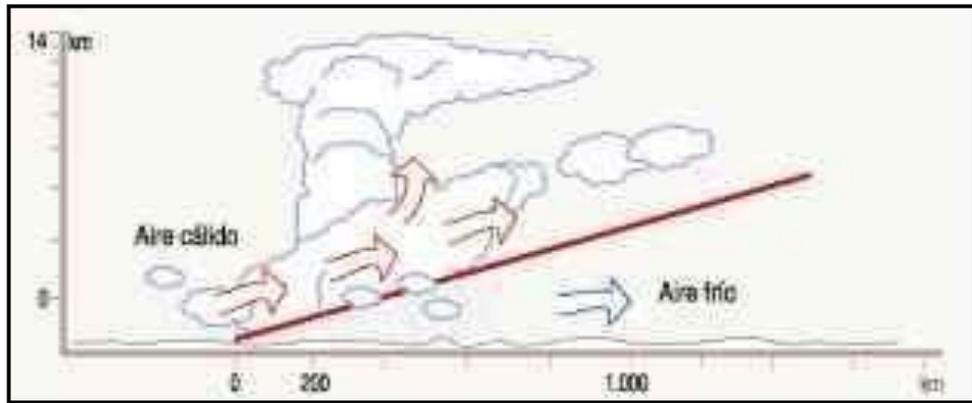


Figura 8.3: precipitación de origen frontal.

Las regiones de baja presión constituyen zonas de convergencia de masas de aire, o sea el aire cercano a la superficie fluye desde los alrededores. Este aire es obligado a elevarse. Este tipo de sistemas de baja presión o ciclones son muy comunes, por ejemplo, en latitudes tropicales y en la estación cálida. La ocurrencia de chaparrones y de actividad convectiva comúnmente se desarrolla dentro del aire convergente de estos sistemas. Tales precipitaciones son combinación de un tipo ciclónico y convectivo.

#### 8.4 Medición de la precipitación

La primera característica distintiva que surge del análisis de la naturaleza de la precipitación es su discontinuidad. Otros elementos del clima, la temperatura por ejemplo, pueden ser medidos en cualquier momento. Pueden efectuarse un número casi infinito de observaciones cada día. En el caso de la precipitación, esto no es posible. Hay días en que no pueden efectuarse observaciones pues el fenómeno no se produce. Aún más, en un día de lluvia, ésta no se registra necesariamente durante todo su transcurso, sino que puede suceder en ciertas horas del mismo, o inclusive en el lapso de unos pocos minutos.

Los aparatos utilizados para la medición de la lluvia son, como se ha visto, el **pluviómetro** y el **pluviógrafo**. La medición de la lluvia se expresa como lámina de agua en milímetros, es decir, por la altura de la capa de agua que se formaría sobre un suelo completamente horizontal suponiendo que sobre dicha capa no se produce infiltración, evaporación, ni escurrimiento lateral. El volumen de una capa de agua de **1 mm** de altura o espesor es equivalente a:

$$1 \text{ litro/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha} = 1000 \text{ m}^3/\text{km}^2$$

Otro aspecto importante de la precipitación es la **intensidad**, o sea la relación que existe entre la altura de la capa de agua y el tiempo o duración de la lluvia. La relación suele ser referida a un minuto (mm/min) o una hora (mm/hora). El instrumento destinado para su medición es el **Pluviógrafo**.

La cantidad de nieve o granizo se expresa como la altura de la lámina de agua que se forma una vez fundida, pudiéndose señalar el caso de la nieve fresca, en que cada centímetro de nieve caída equivale aproximadamente a 1 mm de lámina de agua.

## 8.5 Regímenes de Precipitación

Es también muy importante tener en cuenta la distribución estacional o regímenes de precipitación:

**REGIMEN MONZONICO:** se considera que es “tipo monzónico” cuando las precipitaciones del semestre cálido son iguales o mayores al 80% de la precipitación anual, si bien esto no es el monzón típico de la India, pues allí en el semestre cálido llueve casi el 100% del total anual.

**REGIMEN MEDITERRÁNEO:** se produce cuando las precipitaciones del semestre frío son iguales o mayores al 60% de la precipitación anual.

**REGIMEN ISOHIGRO:** se produce cuando la precipitación se distribuye más o menos uniformemente a lo largo del año.

Una localidad donde las precipitaciones se producen preferentemente en invierno (Régimen Mediterráneo), disminuyendo en verano, cuando la evaporación es mayor, está mucho más expuesta a la ocurrencia de deficiencias hídricas que otra donde la situación sea inversa (Régimen monzónico). En cualquier caso, el conocimiento de la distribución de la precipitación a lo largo del año permitirá determinar si la disponibilidad de las lluvias coincide con las exigencias de los cultivos a lo largo de su ciclo.

## 9. CICLO HIDROLOGICO: Evaporación y Evapotranspiración

### 9.1 DEFINICIONES

El cambio del agua líquida al estado gaseoso (o de vapor) se denomina **evaporación**. En la naturaleza se produce evaporación desde superficies de agua como los océanos, lagos, ríos o lagunas, así como desde suelos desnudos o cubiertos de vegetación, integrándose en este último caso con la **transpiración** de las plantas. La expresión **evapotranspiración** integra los procesos de evaporación del agua desde el suelo y la transpiración de las plantas que lo cubren total o parcialmente.

Thornthwaite (1948), definió el término **Evapotranspiración Potencial (EP)** como "la cantidad de agua que evaporaría un suelo y transpirarían las plantas si los suelos estuvieran en su contenido óptimo de humedad y con cobertura vegetal completa".

Puede deducirse, por lo tanto, que la EP dependerá sólo de factores atmosféricos que influyan sobre el cambio de estado del agua ya que, por definición, se eliminan como variables el contenido de agua del suelo y la cobertura vegetal del mismo. En consecuencia la evapotranspiración potencial representa la necesidad atmosférica de agua.

La evapotranspiración que se produce en condiciones variables de cobertura vegetal y de humedad en el suelo se designa con la expresión **Evapotranspiración Real o Actual (ER)**. Solamente cuando el suelo está en su óptimo contenido de agua y su cobertura vegetal es completa la ER iguala a la EP; en cualquier otro caso, el menor valor de la evapotranspiración real respecto de la potencial, depende de la circunstancial cobertura vegetal y contenido de humedad del suelo.

### 9.2 FACTORES QUE INCIDEN EN LA EVAPOTRANSPIRACION.

La evapotranspiración depende de las **condiciones atmosféricas (factor meteorológico)** que favorecen la transferencia o el traslado de agua desde la superficie de evaporación al aire. Una de las principales es la radiación solar que provee a la superficie evaporante la energía necesaria para que se produzca el cambio de estado del agua. La temperatura de las hojas de las plantas y de la superficie del suelo influye también sobre la evaporación y la transpiración pero como no son variables de fácil obtención, son reemplazadas con frecuencia por la temperatura del aire en los cálculos y estimaciones.

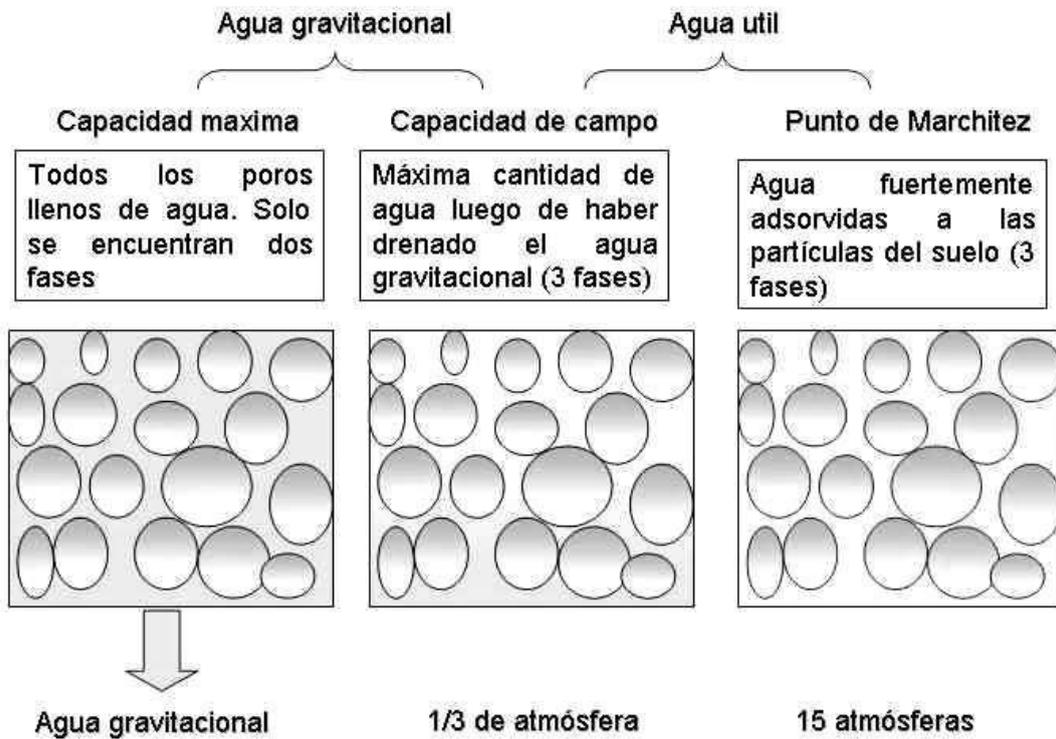
La evapotranspiración está fuertemente condicionada por el contenido de vapor de agua de la atmósfera; en efecto, cuanto menor sea la humedad mayor será el déficit de saturación del aire y, en caso de haber agua disponible, mayor será la evaporación.

La difusión del vapor de agua depende del gradiente de presión de vapor entre la superficie evaporante y el ambiente circundante; el viento favorece esa difusión al renovar constantemente el aire sobre dicha superficie, pudiendo constituir, en muchos casos un aporte adicional de energía advectiva de acuerdo al calor que transporta.

La presión atmosférica afecta también la evapotranspiración dado que una reducida presión facilita un mejor escape de las moléculas de agua desde la superficie evaporante y la duración del día está estrechamente relacionada con la disponibilidad de radiación.

El **factor suelo** está determinado por el aumento de la energía con que el agua es retenida por el suelo a medida que se seca. Esta retención incide en la magnitud de la evapotranspiración, ya que la accesibilidad del agua para las plantas se restringe con la reducción de la humedad del suelo. Los distintos grados de movilidad de agua en el suelo están definidos por sus constantes hidrológicas: capacidad máxima, capacidad de

campo, agua gravitacional, capacidad a humedad equivalente, punto de marchitez y agua



higroscópica. (Figura 9.1)

Figura 9.1: Algunas constantes hidrológicas del suelo.

Si el suelo se encuentra a capacidad de campo, “entrega” toda el agua demandada por la atmósfera (expresada por la EP), pero si el contenido de agua es inferior a capacidad de campo, la provisión de agua por parte del suelo no se realiza en la misma proporción (Figura 9.2).

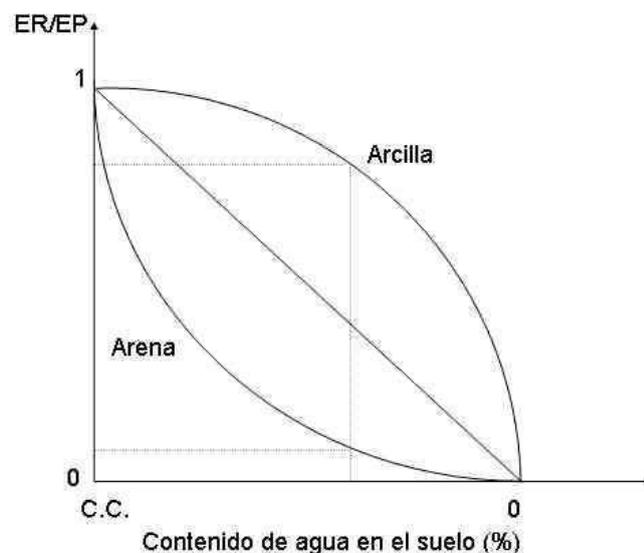


Figura 9.2: Curvas de retención de agua de dos tipos de suelos.

El **factor planta** está determinado por las diferencias anatómicas y fisiológicas de los cultivos y sus estados fenológicos. La velocidad de transpiración varía de acuerdo al tamaño, color, morfología y disposición de las hojas de las plantas y al mecanismo de regulación de apertura y cierre de los estomas.

### 9.3 MEDICION Y ESTIMACION DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

#### Medición

La medición de la evapotranspiración se basa en la observación de la disminución del contenido de agua en un volumen de suelo explorado por las raíces de las plantas que cubren el suelo. Esta determinación puede realizarse empleando instrumentos denominados evapotranspirómetros, en los cuales el suelo se mantiene constantemente en capacidad de campo y con cobertura vegetal total, por lo cual permiten medir la EP. En cambio los lisímetros, en los que la cobertura y humedad edáfica son variables, permiten medir la ER. Los múltiples recaudos y dificultades operativas que presentan estos instrumentos han reducido su difusión a un escaso número de instituciones especializadas en el tema y generalizado la utilización de diferentes metodologías de estimación.

#### Estimación de la evapotranspiración potencial

Estimación de la evapotranspiración potencial según el método de Thornthwaite.

Thornthwaite calculó la relación entre la temperatura media mensual y la evapotranspiración potencial para 4 áreas distintas de EEUU. Encontró una relación exponencial entre la temperatura media mensual y la EP mensual, que puede expresarse según la siguiente ecuación:

$$EP_j = c_j 16 (10 t_j / I)^a$$

$EP_j$  = Evapotranspiración potencial para cada mes  $j$  (mm).

$t_j$  = Temperatura media mensual para cada mes  $j$  (°C).

$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 + 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 0,01792 I + 0,49239$

$I$  = Índice calórico anual

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

$i_j$  = Índice calórico mensual para cada mes  $j$ .

$$i_j = (t_j / 5)^{1,514}$$

$c_j$  = coeficiente de ajuste para cada mes  $j$ , que varía según el número de días del mes  $j$  ( $N_j$ ) y las horas de heliofanía astronómica promedio para el mes  $j$  ( $H_j$ ). La ecuación original se basaba en meses de 30 días y días de 12 horas de heliofanía astronómica.

$$c_j = \frac{H_j N_j}{12 \cdot 30}$$

Estimación de la evapotranspiración potencial por el método de Penman según Frere (1972)

Penman desarrolló una ecuación para estimar la evaporación de una superficie libre de agua  $E_o$  como función de algunos elementos meteorológicos.

$$E_o = \frac{\Delta Q_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

$\Delta$  = Gradiente de tensión de saturación en función de la temperatura en hPa/°C.

$\gamma$  = Coeficiente psicrométrico.

$Q_n$  = Radiación neta.

$E_a$  = término advectivo.

Para obtener la evapotranspiración potencial en base a la evaporación  $E_o$  calculada se multiplica por un factor  $f$  que varía entre 0.6 para los meses invernales y 0.8 para los estivales:

$$EP = E_o f$$

Frere (1972) realizó una modificación de la fórmula original de Penman, principalmente en el término advectivo.

$$EP = \frac{\frac{P_o \Delta}{P \gamma} [Q_n] + E_a}{\frac{P_o \Delta}{P \gamma} + 1}$$

donde:

$p_o$  = presión atmosférica media a nivel del mar, en hPa

$p$  = presión atmosférica en hPa a la altura de la estación

$\Delta$  = gradiente de tensión de saturación en función de la temperatura en hPa/°C

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico (0,66)

$Q_n$  = radiación neta expresada en mm de agua evaporable (1mm/59cal)

$E_a$  = término advectivo.

La radiación neta y el término advectivo son estimados a partir de datos medidos de temperatura, tensión de vapor, viento, heliofanía real y de las estimaciones de radiación solar al tope de la atmósfera y de la heliofanía astronómica:

$$Q_n = \left[ \frac{h}{H} Ra (0,18 + 0,55 \frac{h}{H}) - \sigma T^4 K (0,56 - 0,079 \sqrt{ed}) (0,10 + 0,90 \frac{h}{H}) \right]$$

$$E_a = 0,26(e_s - ed)(1,00 + 0,15U)$$

donde:

$Ra$  = radiación solar al tope de la atmósfera (astronómica)

$h/H$  = relación entre heliofanía real y teórica (heliofanía relativa)

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman

$T$  = temperatura del aire (°K)

$ed$  = tensión de vapor del período considerado (hPa)

$e_s$  = tensión de saturación del vapor (hPa)

$U$  = velocidad media del viento a 2 m de altura (km/h). Para valores de viento medidos a 10 m se debe aplicar un factor de corrección de 0.78.

## **Metodología de Blanney y Criddle**

Esta metodología es la más utilizada para calcular **uso consuntivo** de agua de los cultivos **UC** (cantidad de agua consumida por las plantas). Las variables climáticas utilizadas para su estimación son la temperatura media mensual y el porcentaje de horas diurnas respecto del total anual.

$$UC = Kc f$$

donde:

**UC** = uso consuntivo (mm/día)

**Kc** = coeficiente de cultivo

**f** = factor de uso consuntivo

$$f = p (0,46 t + 8,13)$$

**t** = temperatura media mensual (°C)

**p** = porcentaje medio diario de horas diurnas respecto del total anual, calculado para cada mes

El coeficiente de cultivo expresa la relación entre la evapotranspiración potencial del cultivo y la evapotranspiración potencial de referencia, y su valor se determina experimentalmente en función de las características de las plantas y de su estado fenológico.

$$K_c = \frac{E_{tc}}{E_{to}}$$

El concepto de **evapotranspiración de referencia Eto** (Doorembos y Pruitt, 1976) alude a la evapotranspiración de un cultivo de bajo porte (pradera de 7 a 15 cm) que cubre completamente el suelo y no sufre limitación en el consumo de agua. Cuando la evapotranspiración hace referencia a un cultivo determinado se la denomina **evapotranspiración del cultivo Etc**. Doorembos y Pruitt (1976) la definen como la "evapotranspiración de un cultivo exento de enfermedades que crece en condiciones óptimas de suelo y de fertilidad, y agua suficiente en el que se llega al potencial de producción". La evapotranspiración del cultivo queda determinada por las características de crecimiento y las condiciones ambientales, indicando que la Etc sigue siendo potencial.

FAO (Doorembos y Pruitt, 1977) hace una serie de recomendaciones respecto al uso de la metodología de Blanney y Criddle:

- Se debe aplicar a períodos no inferiores a un mes.
- No debe emplearse en zonas ecuatoriales, por mantenerse casi constante las temperaturas y tener mucha variabilidad otros parámetros meteorológicos ni en zonas de altitud elevadas, por registrar la temperatura mínima diaria valores muy bajos.
- Se proponen correcciones basadas en la humedad relativa y el viento, ya que los errores de estimación pueden ser muy elevados en condiciones de baja humedad y fuertes vientos.

## **9.4. BIBLIOGRAFÍA**

Rosemberg N. J.; H. E. Hart y K. W. Brown. 1968. Evapotranspiration. Review of Research. University of Nebraska. College of Agriculture and Home Economies.  
Thornthwaite C. W. and J. R. Mather. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of technology. Publications in Climatology Volume X. Number 3. Pp 185 - 311, Centerton, New Jersey.

Thornthwaite C. W. and J. R. Mather. 1955. The water balance. Drexel Institute of technology. Publications in Climatology. Volume VIII. Number 1. 104 pp, Centerton, New Jersey.

Tschapek, M. W. 1959. El agua en el suelo. INTA Colección Científica, 402 pp. Buenos Aires, 1959

## 10. BALANCE HIDROLOGICO

### 10.1 Introducción

El término “balance hidrológico” ha tomado popularidad entre climatólogos, geógrafos, geólogos, hidrólogos y todos aquellos investigadores que se relacionan con los problemas del agua en el suelo, y se refiere al balance existente entre la cantidad de agua recibida por el medio de la precipitación y la pérdida de agua debida a la evaporación o evapotranspiración.

Se pueden efectuar diferentes tipos de balance según la característica de los elementos (precipitación P y evapotranspiración potencial EP) utilizados para el cómputo del mismo. Esas características se refieren tanto a la obtención de los valores como al lapso considerado por el balance.

En primer término puede efectuarse una clasificación de los balances hidrológicos en:

- a. mensual climático (BHC).
- b. De series temporales, mensual meteorológico o seriado (BHS).
- c. diario.

Dado que difieren no sólo en la forma de cálculo sino, principalmente, en las conclusiones que se pueden obtener de sus resultados es importante tener en cuenta sus características cuando desean utilizarse para distintos fines.

### 10.2 Balance hidrológico climático (BHC)

Fue introducido en la literatura por Thornthwaite en 1944 quien lo usó posteriormente como base para su nueva clasificación de climas en 1948.

Es un balance climático porque utiliza valores estadísticos medios de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (EP). Comparando la marcha estacional de la precipitación mediante sus valores mensuales con la evapotranspiración, también mensual media, puede calcularse la magnitud de otros parámetros que relacionados, tales como el exceso y la deficiencia de agua, el almacenaje de humedad del suelo y la evapotranspiración real.

El balance hidrológico climático (BHC) se ubica una escala macroclimática. Por utilizarse valores climáticos, promedios de una larga serie de años, los parámetros mencionados precedentemente, reflejan también una situación hídrica media o normal del clima para el lugar considerado, y **su aplicación deberá extenderse exclusivamente a las consecuencias naturales producidas por la acción de los elementos meteorológicos a través del tiempo**, por ejemplo el tipo de suelo y el tipo de vegetación natural. Su utilización también es adecuada para delimitar áreas geográficas para la implantación de cultivos y la determinación de sus áreas óptimas, marginales e ineptas, tal cual lo señalan las clasificaciones agroclimáticas. Es decir que estas últimas marcan como las necesidades hídricas medias de las distintas etapas biológicas de una especie son satisfechas por las disponibilidades regionales indicadas por el BHC.

Corresponde hacer algunas aclaraciones respecto de los dos elementos EP y P mensuales, utilizados en BHC. La EP representa la necesidad en agua y puede estimarse, como se ha visto, por una cantidad grande de métodos diferentes, que van desde los más simples, que utilizan un sólo elemento climático, hasta los muy complejos, en los que intervienen varios componentes del clima responsables del pasaje de agua desde el suelo y las plantas a la atmósfera. De todas formas las principales limitaciones se deben al uso de la P mensual media que no siempre es la medida de tendencia central representativa de la serie de la que proviene por tratarse, como se ha visto de un fenómeno irregular y discontinuo. Podría ser algo más correcto efectuar el BHC, utilizando en los cómputos la precipitación mensual mediana pero,

lamentablemente, este valor no siempre aparece en las Estadísticas Climáticas. No obstante, el BHC constituye una herramienta relativamente sencilla y confiable para el diagnóstico climático de las situaciones hídricas y su empleo en la comparación del clima hídrico de distintas regiones se halla muy extendido.

Para efectuar el balance entre el agua llegada a la superficie y la pérdida por evapotranspiración, hay que tomar en cuenta que el agua que llega al suelo no se almacena en un recipiente del cual puede evapotranspirarse libremente. Por el contrario, comienza a formar parte de un sistema disperso que la retiene de distinta forma según su textura y estructura y a su vez, podrá ser llevada a la superficie según la profundidad de las raíces de la vegetación que cubre ese suelo. Como ejemplo se puede citar que un suelo arenoso puede contener solamente de 10 a 20 mm de agua por cada 30 cm de profundidad, en tanto que un suelo de arcilla fina puede almacenar 100 o más mm en ese mismo espesor.

Las raíces de los cultivos hortícolas no penetran más que pocos centímetros, en tanto que las de otros cultivos pueden superar el metro, de ahí que el agua que estará disponible para evapotranspirar en los diferentes suelos variará según la profundidad de las raíces de los cultivos o vegetación considerada. De la combinación del contenido de agua máximo que puede retener un suelo en función de su tipo y estructura, así como de la profundidad de las raíces, se han confeccionado tablas o expresiones numéricas que indican el contenido máximo para cada caso y la retención que se produce a medida que el suelo se va secando ante demandas sucesivas de evaporación.

Para el conocimiento de la **capacidad máxima de retención** de un suelo es necesario conocer la densidad aparente (DA), la humedad equivalente (HE) y el espesor (h) de cada horizonte del suelo.

$$\text{Capacidad de retención (mm)} = \text{DA (gr/cm}^3\text{)} \cdot \text{HE (cm}^3\text{/gr)} \cdot \text{h (cm)} \cdot 10 \text{ (mm/cm)} \quad (1)$$

Sumando los mm que corresponden a cada horizonte, se llega al almacenaje total hasta la profundidad que pueden penetrar las raíces o hasta un metro que es la profundidad que se considera en términos generales para cálculo comparativos en escala geográfica. Cuando se quiere expresar la humedad actual de un suelo se reemplaza el valor de HE de la ecuación anterior por el de la humedad actual determinada por el método gravimétrico.

### 10.2.1 Cálculo del balance hidrológico mensual climático

Conociendo la evapotranspiración potencial (**EP**) y la precipitación media mensual de un lugar (**P**), es posible efectuar el balance hidrológico. Se describirán los pasos para la confección del BHC en una localidad determinada utilizando una planilla tipo, y se presentarán distintos casos según el tipo de localidad considerada.

#### I. Evapotranspiración Potencial (EP)

Corresponde a los mm de evapotranspiración potencial obtenidos por cálculos de acuerdo a alguna de los métodos considerados anteriormente.

#### II. Precipitación (P)

Corresponde a los mm mensuales que se extraen de las estadísticas climatológicas.

### III. Precipitación menos Evapotranspiración (P-EP)

Para determinar los períodos de excesiva o insuficiente humedad, es necesario obtener la diferencia entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (EP). Un valor negativo de (P-EP) indica la cantidad de precipitación que falta para satisfacer las necesidades potenciales de agua del área y su vegetación. Un valor positivo de (P-EP) indica la cantidad de agua que excede, la que en cierto período del año sirve para la recarga de humedad del suelo y escurrimiento. En las localidades en las que se presenta una sola estación húmeda y otra seca, pueden ocurrir dos situaciones:

- a) el suelo llega a capacidad de campo al final de la época húmeda, aunque exista una época seca (donde P es menor que EP), la precipitación anual ( $\sum P$ ) es mayor que la evapotranspiración potencial anual ( $\sum EP$ ). En este tipo de localidades (denominadas **húmedas**) el almacenaje de agua al final del período húmedo está siempre en capacidad de campo.
- b) el suelo no llega a capacidad de campo al final de la época húmeda; en otras localidades denominadas **secas** (por ejemplo Vera, en Santa Fe) la precipitación anual es menor que la evapotranspiración potencial anual, por lo tanto no es posible determinar de antemano el nivel de almacenaje de agua del suelo al final del período seco, pues depende de la distribución estacional de las precipitaciones.

### IV. Almacenaje (Alm)

La humedad retenida o almacenada en el suelo puede calcularse según la metodología propuesta por Thornthwaite, de la siguiente manera:

- a) Para localidades "**húmedas**" ( $\sum P > \sum EP$ ), se considera que al final del período húmedo ( $P > EP$ ) el suelo se encuentra en capacidad de campo; por lo tanto, el almacenaje en el último mes del período húmedo corresponde a la capacidad de campo. A partir de ese momento y durante todo el período seco (para los meses en que  $P < EP$ ), el almacenaje de agua en el suelo puede calcularse a partir del siguiente algoritmo (Sierra, 1984):

$$Alm_t = Alm_{t-1} e^{\frac{DP}{CC}}$$

donde:

**Alm<sub>t</sub>** = almacenaje en el mes considerado

**Alm<sub>t-1</sub>** = almacenaje del mes anterior

**DP** = déficit potencial (P - EP) en el mes considerado

**CC** = capacidad de campo (mm)

Al finalizar el período seco, las precipitaciones mensuales comienzan a ser mayores que la EP. Estos excedentes se van almacenando hasta que el contenido de humedad del suelo llega a la capacidad de campo. A partir de ese momento, todos los excedentes se transforman en excesos.

- b) Para localidades "**secas**" ( $\sum P < \sum EP$ ), al final del período húmedo el suelo puede no encontrarse a capacidad de campo; por lo tanto, el almacenaje en el último mes del período húmedo se estima a partir de la siguiente expresión:

$$Alm_H = \frac{R}{1 - e^{\frac{DP}{CC}}}$$

donde:



Vera, Santa Fé Período 1941-1960 Capacidad de campo = 300 mm.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Año
<b>EP</b>	167	131	110	68	44	30	31	37	54	81	107	145	1005
<b>P</b>	98	96	128	104	60	28	28	31	46	73	102	136	930
<b>P-EP</b>	-69	-35	18	36	16	-2	-3	-6	-8	-8	-5	-9	-
<b>Alm.</b>	126	112	130	166	182	181	179	176	171	167	164	159	-
<b>ΔAlm.</b>	-33	-14	18	36	16	-1	-2	-3	-5	-4	-3	-5	-
<b>ER</b>	131	110	110	68	44	29	30	34	51	77	105	141	930
<b>Exc.</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Def.</b>	36	21	0	0	0	1	1	3	3	4	2	4	75

### 10.3 Balance hidrológico de series temporales o Balance Seriado (BHS)

La cantidad de agua contenida en el suelo y disponible para los cultivos en un momento determinado es un elemento de fundamental importancia para la planificación agrícola, sobre todo para la agricultura en secano. Las dificultades técnicas involucradas en la medición han impedido, hasta el momento, disponer de series observadas extensas y confiables y para un número suficiente de localidades que permita realizar con ellas una agroclimatología regional del agua edáfica, por lo que a tal efecto se recurre a su estimación mediante el cálculo del balance hidrológico.

Mather, (1961) comparó los excesos y deficiencias hídricos de varias localidades para escalas temporales diarias y mensuales. En nuestro país, con un procedimiento parecido, Damario y Pascale (1977), desarrollaron el balance hidrológico seriado (**BHS**) o mensual consecutivo, incluyendo la aplicación de cómputos estadísticos que permiten obtener una interpretación de los resultados con fines netamente agronómicos. El BHS tiene aplicabilidad en una escala mesoclimática, mientras que un balance hidrológico realizado en un paso de tiempo diario, se podrá utilizar en problemas de menor escala espacial y temporal (por ejemplo determinaciones de lámina de riego). Otros autores proponen balances que consideran períodos menores (diario, semanal etc).

Es importante señalar que a medida que va aumentando la unidad de tiempo (día, pentada, década, quincena, mes), también aumenta el error en la estimación del agua edáfica. La subestimación de los resultados obtenidos es mayor cuanto más seca es la localidad. Fundamentalmente se debe a la mecánica intrínseca del balance, que considera como humedad entrante en el suelo a la cantidad de agua que proviene de los valores de P-EP en la unidad de tiempo considerada, y al hecho de que las precipitaciones no se reparten en forma equitativa durante todos los días del período considerado, sino que la precipitación ocurre, generalmente, en lapsos bastante concentrados.

En otras palabras, si analizamos el caso de un balance hidrológico diario, al valor de la precipitación de cada día (si no hay precipitación, esta es cero) se le sustrae el valor de la evapotranspiración potencial de ese día, lo cual es lógico, ya que es normal suponer que durante un día de lluvia suficiente, se evapore toda la cantidad de agua que demande la atmósfera, mientras la lluvia aún no ha penetrado en el suelo. En los días sin precipitación el suelo va cediendo agua para satisfacer la demanda atmosférica en forma proporcional al contenido de humedad del mismo (cuando está en capacidad de campo el agua cedida es similar a la demanda atmosférica y va disminuyendo a medida que el suelo se va secando).

Si por el contrario analizamos un balance con período mensual, al valor de precipitación mensual se le sustrae la evapotranspiración potencial mensual (acumuladas durante ese mes) con lo cual se estaría realizando el balance de agua para el último día del mes. Sin embargo, para valores de precipitación y evapotranspiración mensual idénticos en dos meses diferentes podría ocurrir que en un mes la precipitación ocurra

durante los últimos días del mismo, por lo que el suelo se fue secando desde el principio de ese mes hasta la ocurrencia de dichas precipitaciones; por el contrario en el otro mes podría haber precipitaciones acumuladas en los primeros cinco días del mes, con lo que el suelo se recargó de agua (e incluso pudo haber excesos) y desde el día seis hasta fin de mes, al no haber precipitaciones, el suelo se fue secando.

Como puede verse las situaciones son totalmente distintas (y podría haber infinidad de casos más) sin embargo, para la metodología propuesta pro el BHS no hay diferencias y el resultado final es único.

### **10.3.1 Limitaciones del BHS**

El balance hidrológico es el resultado de la interacción entre la disponibilidad de agua (la precipitación mensual en el Balance Hidrológico Seriado) y las necesidades de agua (dada por la evapotranspiración potencial mensual).

Sin embargo, la precipitación es un valor que no puede considerarse en su totalidad como aporte de agua en el suelo.

En efecto, su eficiencia, dependerá del volumen e intensidad de cada precipitación y del estado de humedad existente en el suelo en el momento de su ocurrencia, por lo que el total mensual puede estar afectado por las pérdidas debidas al escurrimiento superficial y también profundo. Para las precipitaciones diarias existen correcciones que demostraron su eficiencia en el cálculo de la lluvia que realmente se incorpora al suelo en balances hidrológicos diarios, pero que no pueden aplicarse a balances mensuales.

Otra fuente de error que se produce al aplicarse el Balance Hidrológico Seriado en estudios agroclimáticos de áreas extensas, es la variabilidad propia de los suelos en lo que se refiere, principalmente, a la capacidad máxima de almacenaje de agua, al grado de penetrabilidad de las raíces y la curva de desecamiento.

Como en estudios de carácter agroclimático es prácticamente imposible evaluar las diferencias edáficas en áreas de reducida extensión, es práctica común estimar una capacidad de campo media, una profundidad radicular uniforme y una curva de retención lineal como promedio entre suelos francos-arcilloso y franco-arenosos.

### **10.3.2 Balance Hidrológico Seriado o mensual consecutivo (según la metodología de Damario y Pascale)**

Esta metodología permite conocer **probabilidades mensuales** de ocurrencia de situaciones de excesos o deficiencias, las que resultan útiles para la resolución de aspectos agronómicos tales como: planificación de labores culturales, manejo del suelo, rotaciones, manejo de pasturas, pronósticos de rendimientos, régimen de sequía e inundaciones, uso y dotación de maquinarias agrícolas, entre otros.

#### **Metodología**

Es necesario disponer de valores mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial de una serie de 30 o más años. Dado que la variabilidad interanual de la evapotranspiración potencial mensual es mucho menor que la de las precipitaciones por su estrecha relación con la temperatura, puede considerarse una serie de menor cantidad de años para su estimación, utilizando luego un valor mensual medio que se mantiene invariable a través de todos los años de la serie de precipitaciones, resultando entonces que las variaciones en el balance dependerán exclusivamente de las fluctuaciones de la precipitación.

La metodología del balance hidrológico seriado es similar a la del BHC. Como se consideran meses consecutivos el almacenaje de diciembre de cada año es el antecesor de enero del año siguiente.

La metodología del Balance Hidrológico Seriado obtiene el almacenaje correspondiente de un mes a partir del almacenaje del mes anterior y de la necesidad y aporte de agua (EP y P respectivamente) del mes considerado. Sin embargo, cuando se comienza con el balance, salvo casos o excepcionales de tener mediciones de humedad del suelo, no se cuenta con el almacenaje inicial, por lo tanto se puede comenzar el cómputo de dos formas distintas:

- a) Se inicia el balance en un mes o en el último de una serie de meses del primer año en que la precipitación supera holgadamente a la evapotranspiración potencial, lo que permite suponer que en ese o esos meses se ha sobrepasado la capacidad máxima de almacenaje del suelo.
- b) Para situaciones donde falten precipitaciones mensuales suficientemente elevadas, puede recurrirse al arbitrio de comenzar a computar el balance tomando como almacenaje de agua para el primer mes de la serie el 50% del almacenaje máximo, con la seguridad de que la mecánica del balance corregirá el posible error inicial. La corrección se consigue en un lapso inferior a los 24 meses aún en localidades muy secas, por lo cual es necesario despreciar, en los cómputos posteriores, los dos primeros años de resultados.

Luego se continúa con el balance mes a mes, considerando que el almacenaje del mes de diciembre de cada año constituye el antecedente para continuar con el mes de enero del año siguiente.

El valor del almacenaje del mes  $t$  se obtiene sumando al almacenaje del mes  $t-1$  el valor de la diferencia de precipitación y evapotranspiración potencial (P-EP) **si esta es positiva**. Por el contrario, **si esta diferencia es negativa** el almacenaje del mes  $t$  se calcula:

$$Alm_t = Alm_{t-1} \cdot e^{\frac{(P-EP)}{CC}}$$

Se continúa luego con el mes siguiente de la misma manera de acuerdo al valor de P-EP hasta completar todos los años de la serie. La evapotranspiración real (ER), el déficit y el exceso de agua se calculan de la misma forma que en el Balance Hidrológico Climático.

Una vez realizados los cálculos correspondientes, se obtiene para cada mes una determinada situación hídrica: exceso, deficiencia o equilibrio (cuando no existen ni exceso ni deficiencias). Para interpretar la distribución mensual de estas situaciones hídricas se ordenan las series mensuales resultantes desde la mayor deficiencia hasta el mayor exceso y se calculan para cada mes las probabilidades de ocurrencia mediante el uso de percentiles.

#### 10.4 BIBLIOGRAFÍA

1. Forte Lay, J.A. y M.M. Villagra. 1983. El balance hidrológico de Mather (1955), aplicado bajo diferentes unidades de tiempo. Verificación con valores observados y comparación de resultados. XI Congreso Nacional del Agua. Aguas Superficiales I, p. 89-119. Córdoba.
2. Pascale, A.J. y E. Damario. 1977. El Balance hidrológico Seriado y su utilización en estudios agroclimáticos. **Revista de la Facultad de Agronomía** (3ª. Época), 53(1-2):15-34. La Plata. Argentina.
3. Pascale, A.J. y E. Damario. 1983. Variación del agua edáfica disponible para los cultivos en la región oriental argentina. **Revista de la Facultad de Agronomía**. 4(2):141-181.

4. Slatyer, R.O. 1966. The use of soil water balance. Relationship in Agroclimatolgy. UNESCO. Symposius on methods in Agroclimatology. Reading paper C 8,18 p. tables and fig.
5. Thornthwaite, C.W. and J.R. Mather. The water balance. Publications in Climatology VIII, (1):104 p. Drexel Inst. of Tech., New Jersey. 1955.
6. Vargas, W.M. 1982. Excesos y deficiencias de humedad en la región humedad y semiárida argentina. **Atlas**. Tomo 2. Centro de Investigaciones Biometeorológicas. Buenos Aires 135 páginas.

## 11. FUNDAMENTOS DE BIO Y AGROCLIMATOLOGÍA

Guillermo M. Murphy, Antonio J. Pascale y Edmundo A. Damario

### **Bioclimatología Agrícola y Agroclimatología**

Acorde con el papel fundamental innegable que juega el clima en el comportamiento de las especies agrícolas, el estudio de las relaciones entre los cultivos y ganados y el clima corresponden en forma conjunta a la Bioclimatología Agrícola y a la Agroclimatología.

En la Argentina los estudios de estas dos ramas de la Agrometeorología comenzaron con la creación en 1944 de las estaciones agrometeorológicas en la División de Meteorología Agrícola del Ministerio de Agricultura y Ganadería cuyos conceptos básicos se fueron definiendo y ampliando en el transcurso de más de 60 años para alcanzar el estado actual.

La Bioclimatología Agrícola es la disciplina agrometeorológica que estudia las necesidades y tolerancias meteorológicas de los cultivos, así como las que condicionan sus malezas, plagas y parásitos, con la finalidad posterior de determinar la ubicación geográfica donde sus exigencias puedan ser adecuadamente satisfechas para la obtención de una producción económicamente rentable.

Sus objetivos presentan puntos de contacto con ciencias establecidas, como son: la Ecología, la Fisiología y la Climatología, de allí que las varias definiciones hasta ahora postuladas presentan inclinaciones según el punto de vista adoptado. Sin embargo, la Bioclimatología Agrícola es una rama de la Agrometeorología que tiene fundamentos propios derivados de metas precisas y objetivos definidos, los que, unidos a una metodología propia, le confieren una fisonomía particular

Debe reconocerse a H. Geslin (Geslin, 1944) como el primero en postular la Bioclimatología Agrícola con carácter de disciplina independiente. Este distinguido bioclimatólogo francés fue quien consideró posible el estudio de las leyes de crecimiento y desarrollo de los cultivos en función del complejo climático.

Desde el momento que la Bioclimatología Agrícola es una disciplina que busca explicar y cuantificar la reacción de los cultivos como respuesta a las condiciones meteorológicas del ambiente natural donde crecen y se desarrollan, su lugar de trabajo es esencialmente "de campo", aunque, a veces puede recurrir a conseguir respuestas en ambientes controlados. En las investigaciones bioclimáticas para cultivos herbáceos el método de trabajo utilizado es, básicamente, la experimentación en parcelas con siembras periódicas en un lugar o simultáneamente en varios lugares (ensayos geográficos) para someter al material a condiciones meteorológicas varias.

El primer antecedente de siembras continuadas en la Argentina con propósitos bioclimáticos, fue el de las siembras semanales con lino durante dos años consecutivos 1935/36, realizados por los Ingenieros Agrónomos E. Clos y A. De Fina en el campo de la Facultad de Agronomía de Buenos Aires, para determinar la suma de temperaturas que mejor explicara la floración en lino (De Fina, 1939).

El conocimiento del estudio de Geslin se aplicó a siembras quincenales de tres trigos durante los años 1945 y 1946 en la Estación Agrometeorológica de Guatraché (La Pampa), que fundamentan las exigencias bioclimáticas de trigos argentinos frente a Kanred, de origen norteamericano. (Pascale, 1950)

Los ensayos geográficos tienen sendos ejemplos mundiales, el de Vavilov (1926) en Rusia y en el experimento realizado por Azzi en 1928 (Azzi, 1959), que les permitió deducir las características del clima del cultivo de trigo en Europa.

Los antecedentes mencionados de Geslin y Azzi tuvieron eco en la iniciación de los estudios bioclimáticos agrícolas en la Argentina. Sólo a modo de ejemplo y para los primeros años de la investigación iniciada en la década del cuarenta, se citan algunas contribuciones referidas a cultivos extensivos de la Región Pampeana (Pascale y Damario, 1954) y dos colaboraciones a nivel internacional con Brasil y Canadá (Pascale y Mota da, 1964 y Robertson, 1968).

Cuando se tiene conocimiento de las necesidades y tolerancias meteorológicas de los cultivos, además de la influencia que la condición meteorológica puede tener sobre la aparición y virulencia de plagas o enfermedades y sobre la eficiencia de las técnicas productivas agropecuarias, y si paralelamente se dispone información meteorológica y climática de confianza, comienza a desarrollarse la Agroclimatología, disciplina encargada de proveer las bases fundamentales para la planificación correcta de cualquier tipo de emprendimiento agrícola.

En opinión de agrometeorólogos mundialmente reconocidos, el desarrollo y la utilidad de la mayor parte de las realizaciones agroclimáticas dependen especialmente del conocimiento biometeorológico previo.

Existe una marcada interrelación entre las misiones de la Bioclimatología Agrícola y la Agroclimatología, por lo cual es imposible establecer una separación demasiado marcada entre estas dos ramas de la Agrometeorología.

En términos concretos, la Bioclimatología se basa en las influencias de las condiciones meteorológicas, mientras que las disponibilidades climáticas son el material de estudio de la Agroclimatología.

La Agroclimatología es una suerte de aplicación sobre bases climáticas, de los conocimientos disponibles sobre las reacciones cuantificadas que muestran los elementos bióticos de la producción agropecuaria ante la variable condición meteorológica.

Dos son los objetivos principales que corresponden a la Agroclimatología:

1. Estudiar las características espaciales y temporales que presentan los elementos meteorológicos favorables y/o desfavorables a la producción agropecuaria. En forma resumida se podría expresar que le corresponden a la Agroclimatología los estudios referentes a la relación entre el régimen climático y la producción agrícola (Wang, 1963).

2. Valorar la "aptitud" agrícola local o regional según las disponibilidades climáticas, con el objeto de asesorar sobre tipo de emprendimiento conveniente, cultivos posibles, técnicas culturales adecuadas, analogías agroclimáticas, etc.

A semejanza de la Climatología clásica, es una disciplina esencialmente geográfica, aunque la distinguen dos aspectos particulares: la importancia que concede a la variabilidad temporal o frecuencia relativa de los elementos y la consideración de los tiempos fenológicos (Azzi, 1959).

El primer aspecto responde a la característica de empresa a largo plazo de la agricultura, cuyo resultado económico resulta de considerar los éxitos y fracasos a través de muchos años de actividad. "El método de caracterizar los climas por valores medios, usado en la climatología general, es poco adecuado para propósitos agrometeorológicos" (Molga, 1962).

La presentación de los datos de acuerdo a períodos calendario (mes, estación, año) como hace la climatología, no es apropiado en Agroclimatología. En cambio, la utilización de los períodos agrícolas según las etapas fenológicas, permite considerar las diferentes necesidades de los subperíodos de crecimiento y desarrollo y ajustar la disponibilidad climática a esa división temporal. La existencia de "modelos" biometeorológicos para estimar la fenología de muchos cultivos ayuda a estos propósitos. Caso contrario, es recomendable la división del año en termofases, fotofases o hidrofases o según los bioperíodos térmicos.

A pesar de ello, el mes se sigue usando en agroclimatología general por la simplicidad de cálculo, aunque es recomendable hacer referencia a períodos más cortos que permitan un fácil ajuste a períodos fenológicos. La Guía de Prácticas en Meteorología Agrícola (WMO 1963) recomienda el período decádico como el más adecuado para la expresión de los valores.

Las realizaciones verdaderamente agroclimáticas son las que utilizan preferentemente aquellos elementos climáticos, simples o derivados, que son influyentes

en los diversos aspectos de la producción agropecuaria conocidos como "índices agroclimáticos", valores que expresan en forma cuantitativa las relaciones del crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos, la aparición y evolución de sus plagas y enfermedades y la eficiencia de las operaciones y técnicas productivas, con las condiciones meteorológicas y con la temperatura y humedad del suelo en la biosfera.

La variación temporal de estos índices y el estudio de su distribución espacial, constituyen el principal fundamento para los métodos de evaluación agrícola del clima. Su formulación implica adaptar la información climática disponible a las formas de la información bioclimática, transformándola en datos agroclimáticos. Solamente con la disposición de estos índices es posible realizar la evaluación agrícola de un lugar, región o territorio, es decir describir su "Agroclima".

Burgos (1960) definió al agroclima como: "el conjunto de las condiciones climáticas principales, determinantes de otras que son su consecuencia, en sus valores de intensidad, duración, frecuencia y época de ocurrencia, que posibilitan el cultivo económico de una especie determinada". Se podría interpretar que al decir cultivo económico, hace referencia a las condiciones climáticas del área mundial de cultivo de la especie.

Siguiendo estos lineamientos, coincidentes con la metodología empleada por la escuela rusa, la especialidad agroclimatológica tuvo sus inicios en la Argentina en la década del 30 del siglo pasado, al realizarse el análisis, con criterio agrícola, de toda la información existente hasta ese entonces en el Archivo Nacional de Meteorología. Por su importancia como factor desfavorable a la producción agrícola, se confirió un papel prioritario a lo relacionado con el régimen de heladas en el país, analizando en profundidad todos los aspectos relacionados con las temperaturas mínimas.

A través de los años, los conocimientos sobre las disponibilidades agroclimáticas regionales o generales del país, se han desarrollado sin solución de continuidad y, actualmente, la bibliografía agroclimática argentina se nutre de numerosas e importantes contribuciones en los diversos aspectos que cubre su campo de acción.

Para señalar algunos trabajos que se utilizaron para describir o caracterizar áreas o regiones de la Argentina con aptitud agroclimática para cultivos, existentes o a incorporar a la agricultura nacional, pueden citarse: Tipos agroclimáticos para el cultivo de la palmera datilera en la Argentina (Burgos, 1958); Agroclimatología del trigo en la Argentina (Pascale y Damario, 1961); Aptitud agroclimática de la provincia del Chaco para el cultivo del trigo (Pascale y Damario, 1969); Ecología de la vid en la Argentina (Zuluaga *et al*, 1971); Disponibilidades calóricas regionales para diferentes cultivos en la Argentina (Damario y Pascale, 1983); Características agroclimáticas de la Región Pampeana (Damario y Pascale, 1988); Agroclimatología de la colza de invierno (Murphy y Pascale, 1988); Agroclimatología de la colza de primavera (Murphy y Pascale, 1989); Posibilidades agroclimáticas para el cultivo del pistachero en la Argentina (Damario y Pascale, 1991); etc.

### **Terminología bio y agroclimática**

Resulta necesario realizar algunas consideraciones sobre el significado de algunos términos utilizados en este capítulo.

*Necesidad, requerimiento o exigencia* se usan en forma indistinta para significar la calidad o magnitud de la condición meteorológica general, o de algún elemento en particular que resulta indispensable para que el cultivo pueda cumplir adecuadamente su ciclo evolutivo, y la "*tolerancia*" expresa el grado en que los cultivos son capaces de soportar, aguantar o resistir, sin mayores daños, ciertas

manifestaciones en la magnitud de los elementos meteorológicos actuantes, hasta un valor extremo que se conoce "*límite crítico*".

Se aclara que cuando se mencione "disponibilidad meteorológica o climática" de manera general, incluyen a la cantidad y calidad de radiación solar, la intensidad y duración del período luminoso y a la temperatura y grado de humedad de la capa de suelo explorada por el cultivo.

Cuando se haga referencia a "*cultivo agrícola*" sin especificarlo, se entenderá como tal a cualquier comunidad vegetal pura, que mediante prácticas culturales adecuadas, el hombre utiliza para obtener beneficios. Principalmente se hará referencia, salvo aclaración en contrario, a los cultivos de carácter extensivo que pueden prosperar bajo condiciones naturales y en secano. En todos los casos los conceptos explicados son también aplicables a las distintas clases de ganados que forman parte de la actividad agropecuaria en general.

El conjunto de las necesidades y tolerancias meteorológicas de todas las variedades y cultivares de un cultivo forman el "*bioclima*" de ese cultivo.

Dentro del *bioclima* de un cultivo, pueden existir variedades o cultivares que presentan diferente grado de necesidad o tolerancia a uno o varios factores biometeorológicos, constituyendo los diferentes "*tipos bioclimáticos o biotipos*", o sea que manifiestan similares exigencias meteorológicas para cumplir su ciclo productivo. Por ejemplo, en el bioclima de los trigos cultivados, la exigencia en frío separa los biotipos invernales de los primaverales, la diferente necesidad fotoperiódica clasifica a los biotipos o grupos de maduración en el cultivo de la soja; en los frutales cada especie tiene cultivares con distinta necesidad de frío durante el descanso invernal o requerimiento de calor para el cumplimiento del ciclo biológico.

El conjunto de condiciones climáticas de un lugar o región geográfica que definen la posibilidad y desarrollo de determinadas actividades agropecuarias explica el concepto de "agroclima".

Los agroclimas pueden recibir diferentes denominaciones según la actividad primordial que se desarrolle en ellos; cerealeros, ganaderos, hortícolas, etc. y para precisar las diferentes condiciones que presentan, según la aptitud para la explotación agropecuaria o las varias exigencias biometeorológicas que presentan, se usa la denominación de "*tipos agroclimáticos*".

Para un cultivo dado, un tipo agroclimático "*óptimo*" es un área geográfica donde las condiciones climáticas son favorables para realizarlo, con la seguridad de obtener los mejores rendimientos en cantidad, calidad y regularidad. A medida que la disponibilidad climática se va alejando de esa favorabilidad total, el agroclima se va degradando y pasa a ser "*muy bueno*", "*bueno*", "*regular*", "*marginal*", y por fin "*inepto*" o "*inadecuado*".

Según la principal condición meteorológica que se desea analizar, los tipos agroclimáticos pueden recibir las denominaciones de: seco, húmedo, frío, cálido, etc., con graduaciones como: excesivo, normal, deficiente, etc.

Entre las exigencias del bioclima de un cultivo y las disponibilidades agroclimáticas del lugar donde se desea implantarlo, pueden existir distintos grados de coincidencia que van desde una complementación total hasta una disidencia de tal magnitud que torne imposible introducirlo. Cuando las diferencias no son excesivas, es posible modificar alguna de las condiciones, ya sea las exigencias del cultivo o las disponibilidades del lugar para resolver el problema.

La modificación por ampliación del bioclima de un cultivo agrícola, se logra creando variedades o cultivares con diferente gama de necesidades o con mayores límites de tolerancia, es decir, aumentando el número de los tipos bioclimáticos existentes. En cambio, la extensión del agroclima se hace modificando artificialmente aquellas condiciones adversas del microclima del lugar para adecuarlas al bioclima del cultivo. Algunos ejemplos aclararán el punto.

Los amplios bioclimas de los cereales y oleaginosas, sean invernales o estivales, encuentran condiciones favorables de cultivo en la gran región oriental

Argentina de secano y, solamente, deben seleccionarse aquellos biotipos que satisfagan sus exigencias en la gama de disponibilidades agroclimáticas regionales.

Los frutales muy sensibles al frío y sin tolerancia alguna a bajas temperaturas, como el cacao, no pueden cultivarse en el país, ya que no existe lugar alguno libre de la posibilidad de ocurrencia de temperaturas invernales que dañen o destruyan las plantaciones. Otros con cierta resistencia a bajas temperaturas, como cafeto, ananá o bananero, sólo encuentran agroclimas reducidos en el norte de la Argentina.

Los frutales de gran exigencia en frío durante el descanso invernal, debieron ser ubicados en áreas del sur del país en donde la satisfacen, pero, para lograr un agroclima apto, se debe aplicar riego total y protección contra heladas. Para este tipo de producciones, el mejoramiento vegetal ha logrado filogenéticamente cultivares o biotipos poco exigentes en frío, lo que ha permitido transformar en agroclimas aptos a regiones que por su escasa disponibilidad de frío invernal se consideraban anteriormente como marginales o ineptas.

Asimismo, el cultivo de especies hortícolas o florales bajo protecciones o irrigación (tanto en cultivos intensivos como extensivos), significa una ampliación de los agroclimas naturales, anulando las condiciones adversas que le impiden cumplir su ciclo productivo.

### **Períodos bio y agroclimáticos**

En la terminología agrometeorológica se usan expresiones como termofase, período de cultivo, bioperíodo, etc., identificando etapas especiales que, dentro del año, ayudan al análisis de las condiciones favorables para la agricultura y a la aplicación de los resultados, debido, fundamentalmente, a que los cultivos completan sus ciclos biológicos satisfaciendo sus necesidades particulares en temperaturas y duración del día, los dos elementos fundamentales en la posibilidad y distribución de los cultivos, cuando está satisfecha la disponibilidad hídrica.

Aunque la acción de ambos elementos – temperatura y duración del día- se manifiesta de muy diversas maneras, aquella que se refiere a la variación anual y diaria adquiere singular importancia como factor biometeorológico en la ocurrencia y el ritmo de aparición de los distintos momentos que componen el ciclo ontogénico.

En biometeorología, la duración del período luminoso que se extiende desde el inicio del crepúsculo matutino a la finalización del crepúsculo vespertino, se conoce como “fotoperíodo”.

El esquema de variación anual y diaria del fotoperíodo muestra una regularidad y concordancia que es propia de la posición geográfica latitudinal. La variación entre la duración de los fotoperíodos más largo y más corto dentro del año, que es función de la latitud, se corresponde también con la duración de los fotoperíodos diarios, registrándose los días más largos en verano y los más cortos en invierno. Así, la duración relativa del día como fenómeno diario, es un factor que implica en forma absoluta la expresión anual de su variación.

Sobre la base de estas consideraciones y con el objeto de distinguir la acción de los fotoperíodos anuales, se puede representar el ciclo anual mediante una curva como la de la fig. XI.1. En ella, el fotoperíodo medio anual, establece una separación entre la *fotofase positiva*, (con fotoperíodos de mayor duración que el medio) y la *fotofase negativa*. Dentro de cada fotofase, el sentido creciente o decreciente de la duración del fotoperíodo, señala respectivamente las *ramas ascendente* y *descendente*.

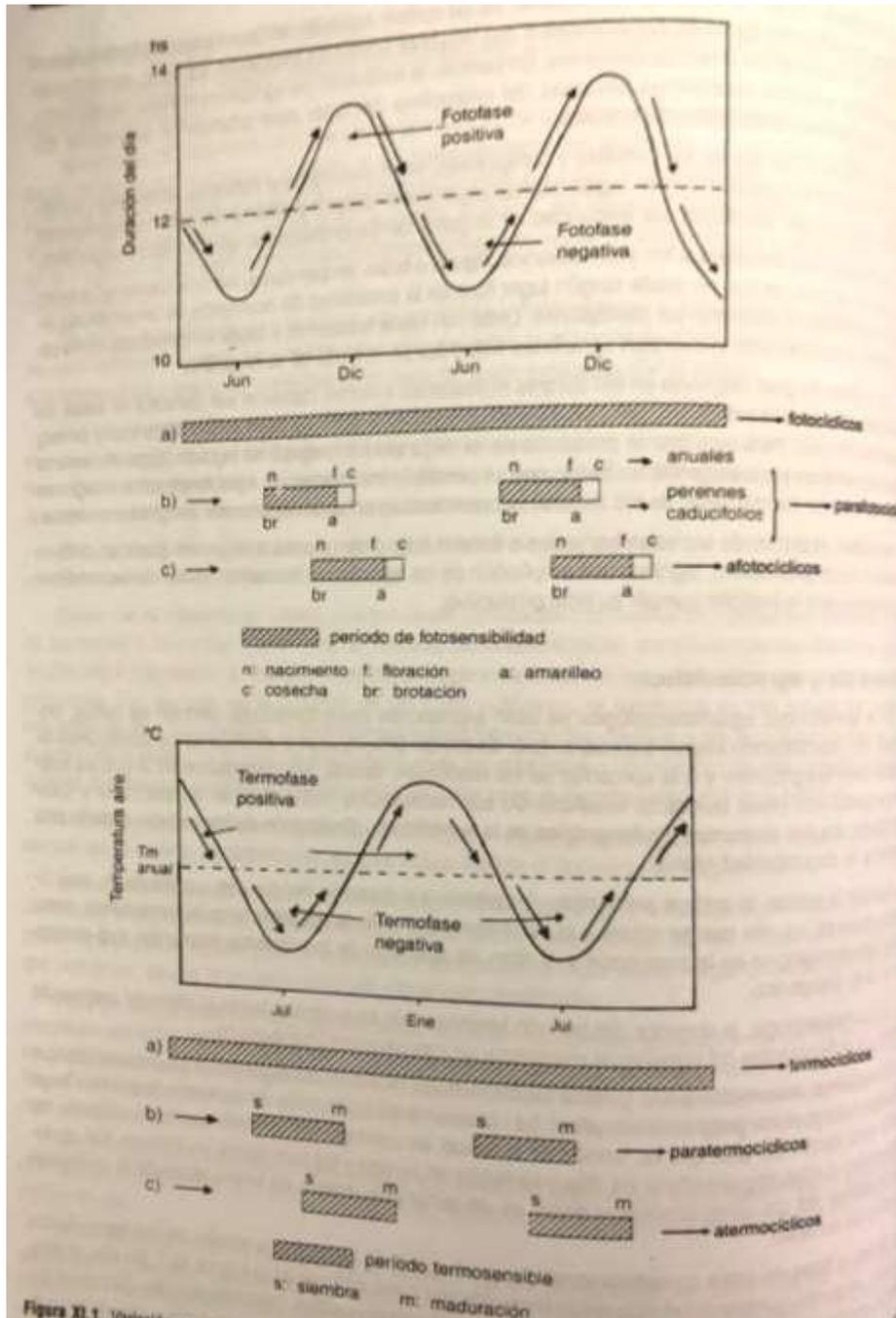


Figura XI.1: Variación anual de las amplitudes térmicas y fotoperiodo y sendos ejemplos de ubicación de cultivos según sus necesidades fototérmicas.

La concordancia entre las variaciones anuales o diarias del fotoperiodo como una función de la latitud, no se reproduce en el caso de la temperatura del aire, cuyas variaciones diarias y anuales – generalmente no concomitantes- obedecen a un sin número de factores climáticos. Es así que la variación o amplitud diaria (diferencia entre la temperatura máxima y mínima) no está directamente asociada a la variación o amplitud térmica anual (diferencia entre las temperaturas medias mensuales más alta y más baja).

La representación gráfica de la variación anual de la amplitud térmica (o ciclo térmico anual) mediante una función sinusoidal como la fig. XI.1, permite separar la duración de la *Termofase positiva*, que comprende los días con temperatura media mayor que la normal anual, y la *termofase negativa*, que abarca los días con medias térmicas inferiores a la media anual.

Dentro de cada termofase, se podrá distinguir las *ramas ascendente y descendente* como lo señalan las flechas en la figura.

El efecto bioclimático de ambos elementos también es diferente: el del fotoperíodo siempre es positivo y favorable para la expresión de los procesos que se suceden en el ciclo vegetativo de un cultivo, especialmente, la floración. Opera como umbral y nunca como acumulación, ni como adversidad.

En cambio, los efectos de la temperatura son múltiples, favorables o desfavorables, durante todo el ciclo ontogénico vegetal. La influencia que la variación o amplitud anual y diaria de la temperatura ejerce sobre el desarrollo de los vegetales, se ha denominado *termoperiodismo* y por lo tanto el *termoperíodo* (anual o diario) expresa la magnitud, en grados Celsius, de tales variaciones.

Sobre la base de estos conceptos, Burgos (1952), desarrollo sendos esquemas de calificación o denominación bioclimática de los vegetales de acuerdo a la acomodación o coincidencia de sus ciclos ontogénicos con los periodos de variación anuales del termo y fotoperíodos, y las variaciones que experimentan en cuanto a la sensibilidad o exigencia en tales variaciones.

Con relación al fotoperiodismo y teniendo en cuenta la coincidencia entre la presencia en la planta de órganos o tejidos activos o sensibles a la acción de la luz (hojas o partes con pigmentos fotosintetizadores) y las fotofases anuales, clasificó a los vegetales en tres grupos: (a, b y c de la parte superior de la fig. XI.1)

a) *Fotocíclicos*: aquellas especies que presentan tejidos activos a la luz durante un ciclo o más de variación en la duración del día. Comprende todas las especies de hojas siempre verde. Ejemplo: naranjo.

b) *Parafotocíclicos*: aquellas especies que presentan tejidos activos a la luz en ambas fases del ciclo de variación anual en la duración del día, pero sin llegar a completarla. Ejemplo: trigo invernal y demás, cereales invernales.

c) *Afotocíclicos*: aquellas especies que presentan tejidos activos a la acción de la luz, sólo en una de las fases del período de variación anual referido. Ejemplo: maíz y demás cultivos de verano.

Con relación al termoperiodismo, Burgos clasifica a las especies vegetales también en tres grupos, según la coincidencia que presentan los tejidos sensibles a la acción térmica con el ciclo anual de variación: (a, b y c de la parte inferior de la fig. XI.1)

a) *Termocíclicas*: aquellas especies cuyo ciclo ontogénico con tejidos activos a la temperatura coincide con uno o varios períodos anuales de variación de la temperatura. Ejemplo: manzano, naranjo, perennes y bianuales.

b) *Paratermocíclicas*: aquellas especies cuyo ciclo ontogénico con tejidos activos a la temperatura coincide parcialmente con las termofases positiva y negativa del termoperíodo anual, pero sin completarla. Ejemplo: trigo, centeno, etc.

c) *Atermocíclicas*: especies cuyo ciclo ontogénico con tejidos activos a la temperatura comprende sólo la termofase positiva del termoperíodo anual. Ejemplo: maíz, girasol, tabaco, etc.

La clasificación o denominación de los cultivos mediante este esquema permite no sólo ubicar los períodos de cultivo de las especies, sino anticipar las principales exigencias grupales que deben satisfacer en su lugar de cultivo.

Algunos ejemplos de denominación de cultivos según esta clasificación:

a) Manzano: especie termocíclica y afotocíclica. Termocíclica porque siempre tiene órganos reaccionantes a la temperatura, sea a favor (cumplimiento de la exigencia en frío, temperaturas favorables o sumas térmicas adecuadas) o desfavorables (mínimas críticas). Afotocíclica, porque el período vegetativo comienza en primavera después que ha comenzado la termofase positiva y culmina en otoño antes que termine esa termofase.

b) Citrus: termocíclicos y fotocíclicos.

c) Trigo: paratermocíclicos y parafotocíclico

- d) Girasol: atermocíclico y afotocíclico
- e) Sandía: atermocíclico y afotocíclico

Dentro de la termofase positiva del termoperíodo anual se ubica el *verano térmico* cuando las temperaturas normales diarias superan los 20° C, y dentro de la termofase negativa la extensión del *invierno térmico* se corresponde con valores diarios inferiores a 10° C.

La intensidad de la termofase positiva se puede valorar por suma de temperaturas sobre diferentes niveles o por las unidades calóricas acumuladas, por la frecuencia de días con temperatura máxima extrema, etc. La intensidad de la termofase negativa, por la acumulación de horas de frío o de unidades de enfriamiento, por la frecuencia de temperaturas mínimas críticas, etc.

Con relación a la variación anual de las condiciones hidrológicas, la *hidrofase positiva* comprende el período sin deficiencias en el balance hidrológico y la *hidrofase negativa* cuando falta adecuada humedad de suelo.

Otra división temporal muy usada en agroclimatología es la de los *bioperíodos*, término introducido por Daigo (1957) al desarrollar la zonificación agroclimática de Japón, para designar el período anual con temperatura media diaria mayor a 5° C. Este concepto se generalizó en la Argentina (Damario y Pascale, 1983) para la denominación de los lapsos anuales con temperaturas medias diarias mayores a la temperatura de vegetación inicial o “umbral inicial de crecimiento” de los distintos grupos de cultivo. Así se considera bioperíodo de 5° C para los anuales invernales, bioperíodo de 10° C para los de media estación y estivales poco exigentes (tipo maíz o girasol) y el bioperíodo de 15° C se reserva para los estivales más termófilos (algodón, soja, sorgo granífero). Además, se considera como bioperíodo térmico efectivo al lapso del bioperíodo que no es afectado por las heladas, es decir, el que se extiende entre las fechas de primera y última helada. En cultivos muy sensibles a heladas, y para mayor seguridad y evitar daños, este período no destructivo para la vegetación se determina descontando a la fecha media de las primeras heladas, o agregando a las últimas, tantos días como indiquen las respectivas desviaciones típicas.

Los bioperíodos efectivos también pueden limitarse por temperaturas máximas perjudiciales, por ejemplo: medias mensuales mayores de 26° C, o máximas medias mayores de 35° C, valores climáticos que podrían señalar situaciones de estrés o exceso calórico.

En la literatura agroclimática sajona, el período anual libre de heladas es denominado “growing period” o “growing season” aunque la verdadera extensión y calidad del “*período de cultivo*” debe incorporar otras condiciones favorables para la producción, como son las calóricas, fotoperiódicas, hídricas, etc. Dado que las necesidades biometeorológicas de los diferentes cultivos son distintas y variables en magnitud y época, resulta impropio precisar una condición única para el “período de cultivo” con fines agroclimáticos generales. Así, por ejemplo, en términos agroclimáticos podría aceptarse que el período de cultivo para una especie anual estival medianamente exigente en temperaturas para su crecimiento, comprendería el lapso anual libre de heladas perjudiciales de 150 días de duración, o más, con temperaturas normales diarias mayores de 10°C y máximas medias mensuales menores de 30°C. Además, debería disponer una condición hídrica mensual equilibrada o sin grandes excesos en el 50% o más de los años. A estas condiciones bioclimáticas, podrían agregarse aquellas que permitieran la realización de las labores indispensables para el éxito del cultivo.

## Modalidades bioclimáticas de los cultivos

Si bien cada especie, variedad o cultivar manifiesta exigencias y tolerancias particulares, al considerar el tipo del o de los elementos biometeorológicos de mayor influencia, se pueden agrupar bajo una misma denominación a los que presentan necesidades similares, es decir, que pertenecen a una “*modalidad bioclimática*” común.

Este agrupamiento por modalidad permite también tener una primera idea de cuales serán los principales elementos a considerar en un análisis biometeorológico. Aunque no todas las denominaciones utilizadas en la clasificación de los cultivos hacen al aspecto bioclimático, es necesario mencionarlas porque son de uso corriente.

Atendiendo a la duración temporal del ciclo ontogénico, los cultivos se clasifican en *anuales*, *bianuales* y *plurianuales* o *perennes*. Los anuales, según la época de cultivo, se dividen en *estivales*, *invernales* y de *media estación*. Los estivales, bioclimáticamente clasificados como atermocíclicos y afotocíclicos, incluyen *mesotérmicos* como el maíz y el girasol, y *megatérmicos* como la soja o el algodón. Sus exigencias principales son un gran requerimiento calórico, escasa o nula resistencia a heladas, florecen en fotoperíodos acortándose y por desarrollarse en una época de alta evapotranspiración, tienen gran exigencia hídrica. Los invernales, mayormente paratermocíclicos y parafotocíclicos, tienen poca exigencia calórica para desarrollar, pasando el umbral fotoperiódico aceleran la entrada en floración con el alargamiento de los días, son resistentes a heladas, excepto en floración, y sólo presentan elevada exigencia en agua durante el período crítico.

Sin que pueda hacerse una generalización, ya que existen muchos tipos bioclimáticos, los cultivos anuales, según el rango térmico óptimo y la temperatura inicial de crecimiento, se clasifican en:

a) *Microtérmicos*: comprende la mayor parte de los cultivos invernales, fisiológicamente C3, con rango térmico óptimo de 10 a 20°C y mínima de crecimiento de alrededor de 5°C: trigo, avena, cebada, centeno, colza, lino, etc.

b) *Mesotérmicos*: mayormente C3, con rango térmico óptimo de 20 a 25°C y mínima de crecimiento de alrededor de 10°C: tabaco, girasol, arroz, maní, maíz (C4).

c) *Megatérmicos*: fisiológicamente C4, con rango térmico óptimo de 25 a 30°C y mínima de crecimiento de 15°C más o menos: algodón, sorgo, soja, caña de azúcar, etc.

Los cultivos anuales llamados de *media estación*, son casi todas especies hortícolas, y son de requerimientos varios, cultivados en primavera en los lugares cálidos y en verano en climas fríos.

Este grupo de los cultivos hortícolas debe ser considerado en forma separada, en primer lugar porque muchos de ellos se cultivan no por sus frutos, sino por otros órganos (hojas, bulbos, raíces, etc.) y, secundariamente, porque son de carácter intensivo, desarrollados muchas veces en ambientes controlados. Atendiendo a sus preferencias en temperaturas medias mensuales, se pueden clasificar, de la misma forma que los anuales, en:

a) *Microtermófilos*: prefieren entre 15 a 18°C, y son intolerantes a temperaturas medias mensuales mayores de los 20/22°C. Algunos son resistentes a heladas, como repollo, nabo, espinaca, perejil; otros pueden ser afectados, como: lechuga, arvejas, coliflor, etc.

b) *Mesotermófilos*: crecen entre 15 y 25°C, y son poco o nada resistentes a heladas. Cebolla y ajo son los de menor exigencia calórica y tienen alguna tolerancia a heladas. Un gran grupo, cultivado por sus frutos, prefieren temperaturas entre 20 y 25°C y no toleran heladas ni períodos prolongados de frío: maíz dulce, tomate, melón, zapallo, porotos, etc.

c) *Megatermófilos*: desarrollan bien con temperaturas mayores a los 25°C: sandía, batata, pimientos, etc.

Los cultivos perennes, bioclimáticamente termocíclicos y fotocíclicos, agrupan a forrajeras plurianuales, y a los cultivos arbustivos o arbóreos, divididos estos dos

últimos en *caducifolios* y *perennifolios*. Los caducifolios tienen un período anual de descanso vegetativo donde algunas especies exigen dosis variables de enfriamiento por lo cual se los conoce como criófilos.

Los frutales caducifolios pueden dividirse en a) de fruto carnoso, como manzano, peral, vid, etc. y b) de fruto seco, como nogal, almendro, pecán, etc. Los manzanos, perales, guindos y cerezos prefieren climas con inviernos fríos y veranos frescos, en cambio durazneros, ciruelos y damascos, prefieren inviernos suaves y veranos cálidos con temperaturas medias de 25-28°C, mientras que la vid produce mejor en veranos todavía más cálidos.

A los cultivos que mantienen hojas durante todo el año se los conoce generalmente como *termófilos*, porque su requerimiento calórico es elevado, y se los suele dividir, por su resistencia a bajas temperaturas en *tropicales*, como el cacao, ananá, hevea, agave, palma, etc. y *subtropicales*, como los citrus, olivo, datileros, higuera, café, etc.

### **Ciclo biológico de los cultivos**

El ciclo de vida de los seres vivos está compuesto por una sucesión de etapas “pasivas” (reposo, latencia, dormición, hibernación, descanso, etc.) sin manifestación visible de actividad alguna, y de etapas “activas” donde el individuo crece, cambia su forma o apariencia, presentándose con signos externos de actividad, indicadores del cumplimiento intensivo de procesos fisiológicos internos y continuos. Durante ambas etapas, la actividad vital responde a una serie de fenómenos o manifestaciones que pueden ser diferenciados en dos acciones:

a) *Crecimiento*: conjunto de actividades que se traducen en un aumento de masa, tamaño o peso, por multiplicación celular de los tejidos ya existentes. Hay un aumento de la biomasa en forma *cuantitativa* y mensurable;

b) *Desarrollo*: secuencia de acciones que van llevando paulatinamente al individuo hacia la reproducción y la perpetuación de la especie, manifestándose por la aparición de funciones y tejidos nuevos o la desaparición de algunos existentes. Es un proceso *cuantitativo*, no mensurable físicamente.

Aunque crecimiento y desarrollo son normalmente procesos simultáneos y equilibrados, a veces puede suceder que ciertas condiciones ambientales particulares favorezcan el crecimiento y no promuevan el desarrollo o a la inversa, que las condiciones existentes sean favorables para el desarrollo pero no estén presentes las necesarias para un buen y normal crecimiento. A no ser que se busque conseguir efectos especiales, la mejor producción de los cultivos agrícolas se obtendrá cuando haya una equilibrada proporción entre el crecimiento y el desarrollo, es decir, cuando ninguno de los procesos adquiera excesiva importancia.

### **Crecimiento**

El curso del crecimiento puede ser representado gráficamente por una curva como la parte “A” de la Figura XI.2, la cual indica el aumento acumulado de peso, altura, materia seca, etc., en periodos de tiempo constantes y condiciones uniformes. Esta curva logarítmica puede ser más o menos curvada, más o menos simétrica, según las condiciones ambientales bajo las cuales se produce el crecimiento.

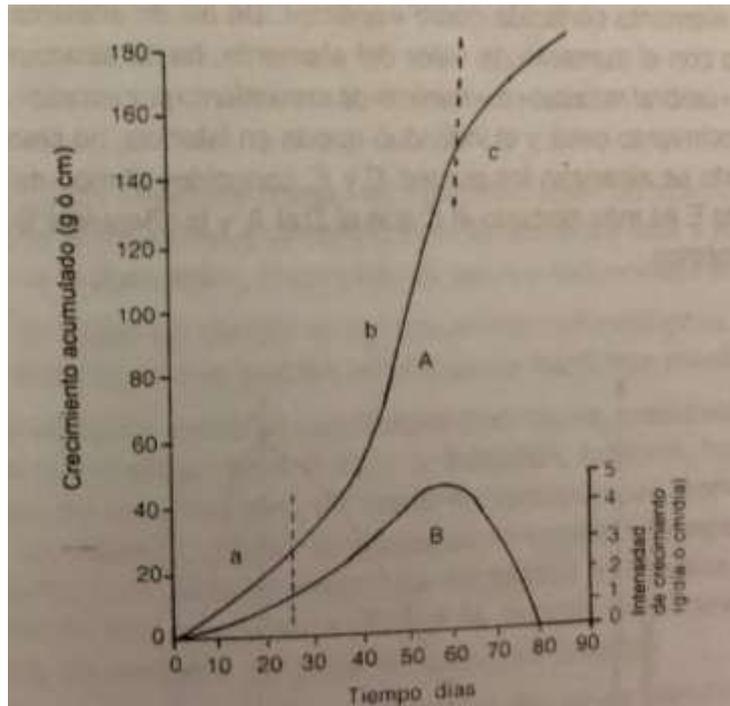


Figura XI.2: Curva de crecimiento. A: Crecimiento acumulado. B: Intensidad de crecimiento.

Es posible distinguir tres etapas fácilmente detectables bajo condiciones meteorológicas o climáticas constantes normales. En la parte inicial "a", el individuo muestra gran actividad, con un crecimiento casi exponencial con el tiempo; la cantidad de materia realmente producida no es grande porque el individuo es pequeño pero la actividad productiva es grande. Durante la segunda fase "b", la cantidad de crecimiento es, más o menos proporcional al tiempo; la actividad no es tan alta como en "a", pero el número de células en asimilación activa es alto y los materiales se acumulan rápidamente. Esta parte ha sido considerada como "el gran período de crecimiento". La parte final "c" está caracterizada por una rápida disminución en la intensidad de actividad y la eventual suspensión del crecimiento. No hay asimilación de nuevos materiales, sino traslocación de los previamente asimilados.

Si el aumento de crecimiento acumulado mostrado en la curva A, se expresa como el incremento parcial dentro de cada intervalo de tiempo, es decir, como "velocidad de aumento" o "intensidad de crecimiento", se obtiene una modificación en la forma de la curva, tal como lo señala en la curva "B", de forma sigmoidea, con una época o período de máxima intensidad de crecimiento y una disminución más rápida después del incremento anterior.

Crecimiento "lineal" se refiere al aumento en altura o longitud; crecimiento "volumétrico" al correspondiente aumento en tamaño o volumen y crecimiento "gravimétrico" al aumento de peso, sea en materia verde o seca.

Según el hábito de crecimiento en las llamadas plantas "determinadas", la finalización del crecimiento sucede cuando la yema apical del tallo se transforma en reproductiva, en las "indeterminadas" la yema apical se mantiene vegetativa y la floración continúa en las ramas laterales y el crecimiento sólo termina cuando comienza la senescencia por condiciones genéticas o meteorológicas adversas.

Si la intensidad de crecimiento se grafica en relación con cualquier elemento meteorológico, se obtiene una curva como la de la Fig. XI.3, en la cual es posible distinguir los "puntos cardinales" de crecimiento. El punto A, llamado "umbral mínimo" o "mínimo de crecimiento por defecto" señala aquella magnitud del elemento que hace posible la iniciación del crecimiento. A partir de este punto, hay una aceleración rápida de crecimiento hasta culminar en el punto B, en el cual se registra la máxima

intensidad, señalando la magnitud del elemento conocida como “*óptimo*”. De allí en adelante hay una desaceleración paulatina del crecimiento con el aumento de valor del elemento, hasta alcanzar un nuevo mínimo en el punto *C*, conocido como “*umbral máximo*” o “*mínimo de crecimiento por exceso*”. Por debajo del umbral *A* y por encima de *B*, el crecimiento cesa y el individuo queda en latencia, no crece aunque sigue vivo. La muerte sobreviene cuando se alcanzan los puntos *D* y *E*, conocidos como mínimo y máximo letales, respectivamente. El punto *E* es más cercano al *C* que el *D* al *A*, y la diferencia *B-A* es mayor que *B-C* por lo que la curva no es simétrica.

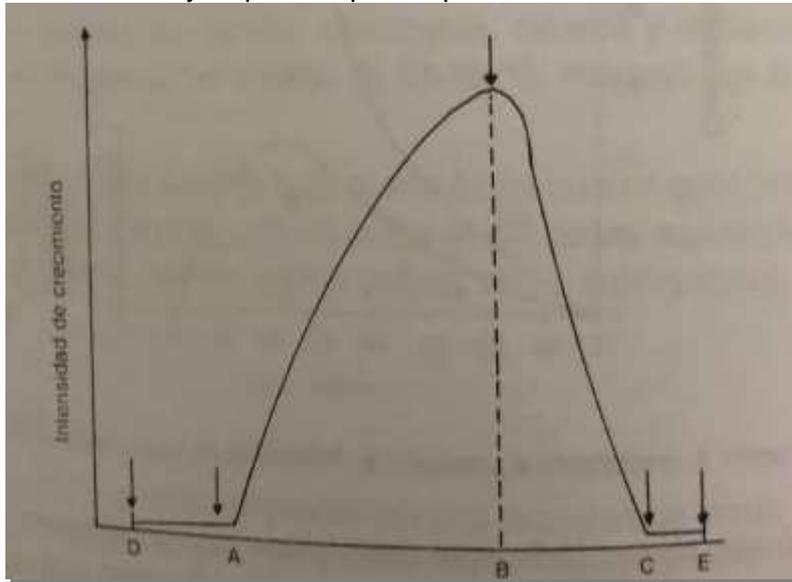


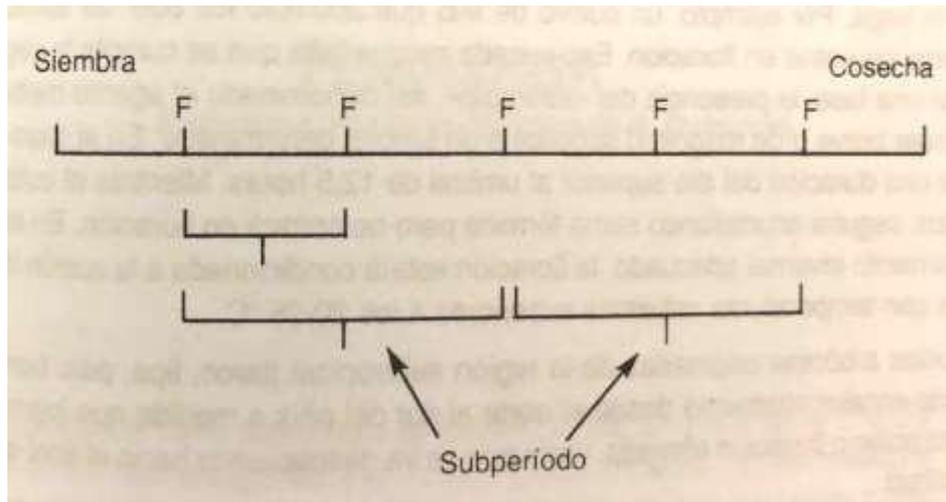
Figura XI.3: Puntos cardinales de crecimiento. A: Umbral mínimo. B: Óptimo. C: Umbral máximo. D: Mínimo letal. E: Máximo letal.

### Desarrollo

En investigaciones biometeorológicas agrícolas, es fundamental conocer y registrar la serie de fenómenos periódicos que manifiestan los cultivos según la manera como satisfacen sus requerimientos meteorológicos en su lugar de implantación, fenómenos que integran el “*desarrollo*”.

El ritmo del desarrollo queda señalado por la secuencia de cambios visibles en la forma y estructura de las plantas, los cuales se producen con una periodicidad que depende de la especie y de la condición meteorológica actuante. Estos cambios en la presentación exterior se relacionan internamente con alteraciones o modificaciones en la fisiología del individuo, exigiendo condiciones meteorológicas externas distintas a las anteriores en cada uno de los nuevos procesos fisiológicos.

Si se representa por una recta el lapso transcurrido entre las fechas de siembra y cosecha de un cultivo anual o el ciclo anual total de un cultivo perenne, pueden señalarse ciertos puntos individualizados como “*fase*” (*F*) que son los momentos de aparición, modificación o desaparición de órganos, o de transformaciones estructurales externas del vegetal, conducentes al cumplimiento del proceso de desarrollo.



Entre fase y fase los tejidos vegetales crecen, es decir, aumentan de peso o volumen preparándose para seguir cumpliendo con el desarrollo, y el tiempo transcurrido entre fase y fase, (no necesariamente consecutivas) se denomina “*subperíodo*”. El conjunto de fases y subperíodos constituye el ciclo anual.

Así como la fase es un índice del cambio en las exigencias meteorológicas, el subperíodo marca la duración del espacio temporal durante el cual las exigencias se mantienen constantes.

Las fases pueden ser *visibles* o *invisibles*. Las visibles (nacimiento, macollamiento, espigazón, maduración, en el caso de un cultivo anual como el trigo; o, brotación, floración, fructificación, maduración, amarilleo y caída de hojas, en un cultivo perenne como el manzano), son motivo de la observación fenológica y, según como se presenten, señalan la respuesta del vegetal al complejo ambiental. Lo mismo sucede con las fases ocultas o invisibles (comienzo de encañazón en cereales, maduración en ciertos frutos, germinación de granos etc.) imposibles o difíciles de detectar visualmente pero que también señalan un aprovechamiento del ambiente por parte del cultivo en cuestión.

En términos generales, la secuencia de fases y subperíodos no es alterable, es decir, una fase no puede producirse sino se ha cumplido la que antecede. En ciertos casos existe una “*intercepción*” o situación producida por el cumplimiento incompleto de las exigencia bioclimática de un subperíodo, señalándose aquí la aparición de la fase de la floración o brotación en frutales de manera alternada, dada la distinta exigencia en frío de las yemas de madera con respecto a las de la flor.

Resulta importante mencionar cuales son las causas determinantes de la iniciación de una fase. Dado que cada subperíodo del ciclo vegetal necesita o requiere de cierta cantidad o dosis de acción de elementos climáticos, el pasaje de un subperíodo a otro, mediante la aparición de una fase, puede cumplirse siempre que el individuo haya llegado a un estado de “*disposición*”, que no es otro que el haber satisfecho las necesidades bioclimáticas propias de la especie para ese subperíodo. Cuando se han completado esas necesidades se dice que el cultivo está “*dispuesto*”, es decir, en condiciones de poder entrar en el subperíodo siguiente, siguiendo con su *proceso fásico*.

Algunos ejemplos aclararán el tema. Se ha comprobado que la floración del lino sólo se produce si el cultivo ha satisfecho la exigencia térmica de acumular, desde el nacimiento, hasta la floración, una suma de temperaturas medias diarias de 900°C o más. (De Fina, 1939). Los frutales criófilos como manzanos y durazneros son incapaces de expresar normalmente su floración si durante el subperíodo de descanso invernal no reciben una cuota mínima de “*horas de frío*”, entendiéndose por tal a aquellas horas con temperatura inferior a los 7° C. Si no reciben la cantidad de horas

de frío necesarias durante el invierno, florecerán mal o no lo harán en la primavera siguiente, por no estar adecuadamente “dispuestos”.

Sin embargo, puede suceder que un individuo que está adecuadamente dispuesto para iniciar la fase siguiente, no lo haga. Por ejemplo, un cultivo de lino que acumuló los 900°C de sumas de temperaturas o más, permanece sin entrar en floración. Eso sucede porque falta que se cumpla la segunda condición para la iniciación de una fase, la presencia del “estímulo”, así denominado el agente meteorológico (o astronómico) de accionar breve o de magnitud superior a un umbral determinado. En el caso del lino “dispuesto”, el estímulo es una duración del día superior al umbral de 12,5 horas. Mientras el cultivo se desarrolle bajo días más cortos, seguirá acumulando suma térmica pero no entrará en floración. En el caso de los frutales, aún con enfriamiento invernal adecuado, la floración estará condicionada a la acción del estímulo de varios días seguidos con temperaturas máximas superiores a los 20°-25° C.

Las especies arbóreas originarias de la región subtropical (tarco, tipa, palo borracho, lapacho, etc.) van floreciendo escalonadamente desde el norte al sur del país a medida que logran superar un umbral térmico de brotación o floración elevado, valor que se va desplazando hacia el final del año a medida que aumenta la latitud.

Otros ejemplos de estímulos para el crecimiento se encuentran en especies como el sorgo y en el algodón que atrasan su floración en condiciones de sequía.

Ambas condiciones, la disposición y el estímulo, deben cumplirse para que el proceso fenológico se desarrolle normalmente.

En los cultivos, cada subperíodo tiene exigencias bioclimáticas diferentes, algunas muy sensibles a determinado factor meteorológico y otras de total indiferencia al mismo. Esto conduce al conocimiento de los “períodos críticos” y los “períodos de latencia” (Azzi, 1959), siempre referidos a un determinado elemento meteorológico. Período crítico es la parte del ciclo vegetativo donde las variaciones del elemento meteorológico en cuestión producen las máximas oscilaciones en el rendimiento final del cultivo, mientras que el período de latencia es la parte del ciclo vegetativo donde esas variaciones no interfieren con la cantidad de rendimiento.

En general, los períodos críticos se corresponden con la máxima actividad vegetal o máxima intensidad de crecimiento, y los de latencia con los de inactividad o etapas de descanso vegetativo en los cultivos perennes o estado de semilla en los anuales.

El lapso que transcurre desde 15 días antes de la espigazón hasta el principio de la maduración es un período crítico para la provisión hídrica en el trigo y cereales de invierno. Para maíz se define como período crítico para agua al intervalo desde 15 días antes de la aparición de la inflorescencia masculina hasta maduración lechosa de los granos.

Los frutales que pasan el invierno despojados de follaje, presentan durante esta estación una gran resistencia a las heladas muy intensas, constituyendo un período de latencia. En cambio, el rebrote y floración primaveral significa un período crítico para bajas temperaturas pudiendo ser dañados por heladas de poca intensidad.

La observación de los momentos o procesos de crecimiento y desarrollo que suceden a lo largo del ciclo biológico total de los seres vivos, es la materia específica de la disciplina conocida como *Fenología*.

## 12 FENOLOGÍA

Antonio J. Pascale y Edmundo A. Damario

### 12.1 Introducción

La vida de los organismos vivos superiores se manifiesta por un crecimiento irregular de su conformación total. Dentro de su ciclo ontogénico experimentan una serie de transformaciones anatómicas y morfológicas que se corresponden internamente con cambios en sus procesos fisiológicos vitales, regidos por sus características genéticas y reguladas por los factores externos del ambiente físico en que crecen y se desarrollan. Todos los fenómenos biológicos observables en la naturaleza presentan un ritmo estacional de ocurrencia variable, de lugar en lugar y de un año a otro, de acuerdo a las variaciones meteorológicas o climáticas acompañantes. La brotación y floración de las plantas, la llegada o partida de aves migratorias, la gestación y nacimiento de las crías de animales, la migración de cardúmenes, etc., son algunos de los miles de fenómenos que suceden en la naturaleza durante el año, con una periodicidad o ritmo que reconoce la influencia de factores astronómicos y/o meteorológicos. Cuando ese ritmo es alterado temporalmente, la causa es siempre una variación en alguno o varios de los elementos meteorológicos condicionantes.

El estudio y explicación sistemática y organizada de estos cambios periódicos en la apariencia de los seres vivos por causas ambientales, es el propósito de la "Fenología", del griego "*Phanesthai*" (aparecer), ciencia que se ocupa de estudiar las relaciones entre los fenómenos biológicos periódicos y las condiciones meteorológicas, analizando y cotejando las variaciones geográficas y temporales que determinan la "aparición" de los seres vivos como respuesta a las variaciones ambientales en tiempo y espacio.

Es una ciencia muy antigua, cuyos primeros antecedentes se remontan a los conocimientos adquiridos por las primeras civilizaciones agrícolas. Desde que los agricultores comenzaron a observar la naturaleza es posible que advirtieran la existencia de la relación entre el comportamiento de sus cultivos y los fenómenos atmosféricos.

Debe atribuirse a Linneo el nombre y la creación de esta ciencia, ya que en 1751 en su "*Philosophia Naturae*" formuló los objetivos y enfatizó sobre su importancia. A su iniciativa se debe la creación en Suecia de la primera red de 18 puntos de observación fenológica, según un método desarrollado por el mismo Linneo.

Durante el siglo XIX, comenzaron a realizarse observaciones fenológicas en numerosos países, en su mayor parte sobre plantas naturales y hacia fines del siglo XIX, casi todos los países europeos contaban con servicios fenológicos oficiales.

La primera referencia fenológica en la Argentina se remonta a 1887 cuando F. Boeuf, primer director del Observatorio Astronómico de La Plata, publicó una lista con la época de floración de algunas plantas silvestres y cultivadas en la zona platense.

En nuestro país, con la creación en 1939 del Servicio de Fenología dentro de la División de Meteorología Agrícola en el Ministerio de Agricultura, comenzó a desarrollarse una Red de Observaciones Fenológicas con la colaboración honoraria de unos 5.000 productores agrícolas, comprendiendo especies cultivadas (cereales, oleaginosos, industriales, frutales), forestales, ornamentales y aves migratorias.

Con la información recogida, pudieron trazarse las primeras cartas fenológicas del país y producirse varios estudios fenológicos.

La ubicación o dependencia científica de la Fenología como rama de la Climatología o de la Biología fue discutida en el pasado. Con la creación de la Bioclimatología como disciplina independiente, con objetivos más amplios que los tradicionales de la Fenología, ésta pasó a formar parte de aquélla. Más aún, la contribución de la Fenología en los estudios bioclimáticos ha quedado reducida a la pura observación fenológica. Desde el momento que el interés de la Bioclimatología se centra en el conocimiento integral de todas las respuestas del individuo biológico al

clima, y no solamente las periódicas, la Fenología sólo cubre un aspecto parcial, vale decir, constituye un apoyo al método de estudio bioclimático.

La observación de los procesos periódicos visibles de los seres vivos, como objetivo básico de la fenología, se ha ido modificando y actualmente su campo de acción se extiende a todos los fenómenos sean o no visibles. Esta diferencia conceptual introduce un importante cambio en la disciplina, desde el momento que incluye la observación periódica de ciertas manifestaciones que, como las modificaciones bioquímicas internas en la constitución y cantidad de sustancias, el aumento de peso y tamaño de partes vegetales, los cambios orgánicos y hormonales en los animales, etc. no son externamente visible y , además, no siempre coinciden con cambios en la presentación externa del individuo, por lo que no podrían ser considerados como cambios fenológicos. La mayor parte de estos procesos ocultos pueden ser cuantificados por mediciones físicas o químicas, por lo que podría hablarse de una *Fenología Cuantitativa o Fenometría*, en oposición a la Fenología cualitativa clásica.

Para simplificar el campo de acción de esta disciplina, lo más adecuado es mantener el término Fenología para todos los fenómenos visibles que hacen al desarrollo, reservando el de Fenometría para los procesos periódicos cuantificables del crecimiento.

### **A. Divisiones de la Fenología**

De acuerdo con el objeto de su interés, se puede hablar de una Fenología Vegetal o Fitofenología y de una Fenología Animal o Zoofenología.

Dentro de la primera, se pueden incluir: Fitofenología Agrícola, (cerealera, hortícola, vitícola, frutícola, forrajera, etc.); Fitofenología Forestal; Fitofenología de Malezas; Fitofenología Ornamental; Fitofenología Alergógena; etc.

Dentro de la segunda: Zoofenología Ganadera o Pecuofenología; Zoofenología Entomológica; Zoofenología Avícola; Zoofenología Ictícola, etc.

### **B. Utilidad y aplicaciones**

Las observaciones fenológicas prestan utilidad a muchas ramas de las ciencias y de las actividades humanas en general, y son particularmente importantes en el campo de las actividades agrícolas.

#### **1. Utilidad en la investigación biometeorológica de cultivos agrícolas.**

Es la aplicación más importante desde el punto de vista agrícola y probablemente la de mayor desarrollo actual. Se la conoce como *Fitofenología Agrícola o Agrofitofenología*. Se refiere a la observación y registro de las fases visibles y no visibles de los cultivos agrícolas, anuales o perennes, en sus aspectos cuali y cuantitativos.

Su interés primordial es coadyuvar como método de estudio en el conocimiento de las exigencias y tolerancias meteorológicas de los cultivos, con el objetivo de aconsejar sobre el lugar, los tiempos y las medidas agronómicas más adecuadas para obtener los mayores beneficios, al aportar este conocimiento a otras ramas de la actividad agrícola y, muy especialmente, a la fitotecnia.

Esta aplicación de la Fenología, como herramienta de investigación en biometeorología, constituye un tema central en los capítulos posteriores, donde recibirá la correspondiente atención.

#### **2. Utilidad en el conocimiento climatológico**

Las observaciones fenológicas sobre vegetación natural, realizadas simultáneamente durante muchos años en diferentes lugares de la superficie terrestre, ordenadas, sistematizadas y analizadas adecuadamente en función de las variables meteorológicas actuantes, permiten revelar los grandes rasgos de las características climatológicas regionales, con mayor sensibilidad que la de los instrumentos medidores.

Las plantas, como elementos del paisaje natural, a través de su distribución geográfica y de su comportamiento fenológico temporal y espacial, son capaces de

manifestar las características climáticas diferenciales de mejor manera que los instrumentos meteorológicos, porque además de poseer mayor sensibilidad, son integradores de los diversos elementos del complejo climático, actuando a modo de un "climatómetro" o "ambientómetro".

Esta aplicación climática de la Fenología es la que impulsó el establecimiento de los "*Jardines o Huertos Fenológicos*" internacionales, en los cuales se realiza, en varios lugares, la observación de una serie de especies arbóreas y arbustivas comunes, de cuyo comportamiento fenológico diferencial y simultáneo a través de los años, es posible deducir una interpretación climática con base biológica.

A partir del año 1963, se implantó en Europa una red de 44 Jardines Fenológicos cubriendo una transecta desde Escandinavia (69° N) hasta Grecia (41° N)

En estos huertos se plantaron 5 especies arbóreas de coníferas, 9 de latifoliadas decíduas y 4 especies arbustivas, todas derivadas por reproducción agámica de una misma planta madre para que, por sus características hereditarias idénticas, aseguraran que su comportamiento fenológico fuera solamente el resultado de la influencia de las condiciones externas. Estos huertos se instalaron en proximidad de estaciones meteorológicas, para la provisión de los datos necesarios en la interpretación de los resultados. De cada especie se plantaron tres ejemplares y las observaciones, en cada lugar, se hicieron siempre sobre la misma planta siguiendo un programa uniforme. Uno de estos huertos, con material proveniente del huerto madre de Alemania, se estableció a fines de la década del 60, en la Estación Agrometeorológica Central de Castelar (Buenos Aires). Las características climáticas de este ambiente, demostraron ser inadecuadas a las exigencias bioclimáticas para esas especies del Hemisferio Norte, las que al poco tiempo murieron.

### 3. Utilidad en la actividad forestal y dasonómica.

Las observaciones fenológicas realizadas sobre especies forestales arbóreas autóctonas o exóticas, aisladas o formando comunidades, son importantes para dirigir el mantenimiento ordenado de la explotación forestal, tanto en los bosques naturales como en los cultivados.

El conocimiento del período vegetativo y las épocas de las fenofases de estas especies hace posible planificar el trabajo forestal, como por ejemplo: la recolección de semillas, la preparación de almácigos y trasplantes, la poda y tala parcial y/o total, el control de plagas y enfermedades, fijar períodos de peligro de incendios, aconsejar especies adecuadas para barreras o cortinas protectoras, etc.

### 4. Utilidad en pasturas y forrajeras.

El buen manejo de las praderas naturales para planificar adecuadamente los períodos de pastoreo y/o descanso exige conocer el ciclo fenológico de las especies vegetales útiles, a fin de no desmejorar la composición florística, permitiendo una buena floración y fructificación que aseguren la continuidad del valor forrajero. En las praderas artificiales, simples o mixtas, y en los cultivos forrajeros en general, las épocas de siembra, de cortes, de crecimiento activo, de descanso, de máximo valor alimenticio, etc., se programan a través del proceso fenológico de las especies utilizadas.

### 5. Utilidad en la fruticultura

En aquellas especies y variedades autoestériles o de floración sexual diferenciada, el conocimiento de la fenología de los cultivares polinizadores, aporta la información necesaria para seleccionar los más convenientes para lograr una fecundación efectiva. La elección de cultivares adaptados a determinadas disponibilidades agroclimáticas, exige el conocimiento de sus necesidades y tolerancias a través de su comportamiento fenológico. El conocimiento fenológico ayuda en la planificación de labores y tratamientos culturales.

### 6. Utilidad en tratamientos fitosanitarios

El registro continuado de las fechas de aparición, y de modificaciones biológicas posteriores de las especies animales y vegetales que se reconocen como plagas y productoras de enfermedades en los cultivos permite programar los servicios de prevención y control contra sus efectos perjudiciales. La aplicación preventiva de sustancias y tratamientos fitosanitarios se basa en el conocimiento previo de los estudios biometeorológicos, sobre el ciclo biológico de plagas y enfermedades. Así, los tratamientos aéreos o terrestres, preventivos o curativos, se podrán realizar en el momento más adecuado y con las dosis necesarias para lograr su máxima eficacia.

#### 7. Utilidad en apicultura

El conocimiento de las épocas de floración de las especies vegetales melíferas permite ordenar el trabajo del apicultor, conocer la calidad de la miel producida y disponer la alimentación suplementaria del apiario en las épocas de escasez florística.

#### 8. Utilidad en paisajismo

La planificación de parques y jardines necesita conocer la época de brotación, floración y fructificación de las especies arbóreas, arbustivas y florales así como la coloración y forma de los ejemplares en distintos momentos del ciclo anual.

#### 9. Utilidad en problemas de alergia

La información permanente sobre las floraciones o aparición de órganos de ciertas plantas capaces de excitar o causar problemas alérgicos, es importante para que los médicos especialistas puedan diagnosticar la especie alergógena y prescribir a sus pacientes las medidas adecuadas.

#### 10. Utilidad en sociología vegetal

En sociología vegetal, en la cual interesa el comportamiento conjunto de las especies integrantes de la comunidad, el conocimiento y registro de sus variaciones fenológicas ayuda al entendimiento de sus relaciones mutuas.

### C. Calendarios fenológicos

La delimitación de las estaciones del año considerando sucesos fenológicos característicos para establecer la iniciación de cada período, se ajusta mejor a las condiciones naturales y es más importante para las tareas agrícolas que las fechas astronómicas o calendarias, las que por ser fijas no se corresponden con las variaciones biológicas. No siempre, ni en todo lugar, las fechas solsticiales y equinocciales se corresponden con la iniciación o llegada de los periodos que la tradición popular ha asociado a formas de presentación de la naturaleza, las cuales están más ligadas a los hechos naturales que a las fechas calendarias. El otoño se manifiesta por el comienzo del amarilleo, la primavera por la reiniciación del crecimiento vegetal, el verano por la maduración de los frutos, etc.

Estos calendarios fenológicos, a los que se llaman naturales, se establecen localmente con los promedios o fechas medias de sucesos fenológicos, vegetales o animales, observados durante muchos años y comparados con las condiciones meteorológicas simultáneas que los explican o determinan.

Para el centro de Europa el fenólogo Dr Inhe, además de indicar él o los sucesos fenológicos que marcan el comienzo de la estación, estableció divisiones dentro de la misma. Por ejemplo, subdividió a la primavera en:

a. *Despertar de la primavera*: la vegetación rompe el descanso invernal y comienza el proceso fenológico con la floración de aquellos árboles, arbustos o herbáceas que florecen antes de brotar, como, *Corylus avellana*, *Salix caprea*, *Populus tremulus*, *Ulmus campestris*, *Taxus baccata*, *Anémoma nemorosa*, etc.

b. *Primavera temprana*: caracterizada por la floración de aquellas especies que florecen y brotan conjuntamente y la brotación de algunos árboles que florecen más tarde, como:

*Prunus padus, Ribes rubrum, Fragaria vesca, Prunus avium, Prunus cerasus, Crataegus oxyacanta, Betula verrucosa, Acer platanoides, Tilia paviflora, etc.*

*Plena primavera:* floración de plantas que previamente brotan: *Sorbus aucuparia, Aesculus hippocastanum, Syringa vulgaris, Cydonia vulgaris, etc.*

En otros lugares, los sucesos fenológicos naturales como floraciones, fructificaciones y maduración de frutos de plantas silvestres y cultivadas, la llegada, nidificación y partida de aves, etc., están relacionados a fechas fijas dentro de cada mes del año (Fig. XII.1).

Los llamados "calendarios fenológicos de cultivos" o, simplemente "calendarios de cultivos", indican las fechas medias en que se producen las distintas fases de un cultivo.

### **Atlas fenológicos**

Para instruir a los observadores fenológicos sobre la identidad y características de las especies a observar, sean plantas, animales, aves, peces, etc., los diferentes servicios preparan publicaciones con fotografías o dibujos detallados para reconocerlos visualmente o para disponer de una guía en la apreciación de las fases y sus momentos. Estas publicaciones reciben el nombre de Atlas y se distribuyen gratuitamente a los observadores.

### **Promedios fenológicos**

Para obtener valores fenológicos medios normales se requiere menor número de años de observación que para los promedios climáticos, ya que las plantas reaccionan al complejo ambiental actuante y no sólo a uno de los elementos climáticos de un lugar. Los cultivos anuales varían su comportamiento fenológico con el cultivar considerado, la fecha de siembra y la variación anual de los componentes climáticos. Así, para una localidad, los valores medios fenológicos de experimentos conducidos durante aproximadamente 5 años, logran un valor medio poco variable para cada época de siembra. En cultivos perennes el ajuste de los promedios se logra más rápidamente, pues al estar anclados en un sitio no incluye la fecha de siembra variable.

En un estudio sobre exigencias bioclimáticas en ciruelos (Pascale y Ruggiero, 1963) se comprobó la estabilización de la fecha de floración de los cultivares con reducida cantidad de años de observación. A medida que se fueron incluyendo quinquenios de observaciones a partir del promedio 1940-44, se fueron obteniendo variaciones no significativas en el período veinteñal 1940-59, con disminución reducida en la variabilidad, tanto a nivel de cultivar como en el promedio de los 15 cultivares. (Cuadro XII.1)



Figura XII.1: Calendario fenológico natural ilustrado, según N. Popov (Adapatado de Molga, 1962)

Cuadro XII.1: Fecha media de comienzo de floración y desviación estándar, de 15 cultivares de ciruelo de la colección pomológica de la Facultad de Agronomía y Veterinaria.

Variedades	Fecha media de comienzos de floración y su desviación estándar			
	1940 - 44	1940 - 49	1940 - 54	1940 - 59
October Purpie	25 ago ± 9,4	27 ago ± 8,8	27 ago ± 8,7	26 ago ± 8,9
Santa Rosa	28 ago ± 12,9	28 ago ± 10,0	28 ago ± 10,0	27 ago ± 8,2
Burbank	30 ago ± 15,7	02 sep ± 13,4	01 sep ± 11,9	01 sep ± 11,9
Golden Japan	04 sep ± 3,0	06 sep ± 4,4	04 sep ± 6,3	03 sep ± 5,9
Abundance	06 sep ± 14,2	07 sep ± 11,8	06 sep ± 11,0	06 sep ± 10,8
Noire Musquee	10 sep ± 17,1	09 sep ± 11,9	08 sep ± 10,4	07 sep ± 10,2
Wright Early	16 sep ± 14,6	13 sep ± 12,1	11 sep ± 11,7	09 sep ± 11,4
Agen	18 sep ± 15,1	17 sep ± 14,7	16 sep ± 14,6	16 sep ± 13,9
Climax	23 sep ± 16,5	18 sep ± 13,9	17 sep ± 13,6	17 sep ± 14,2
Coeur de Boenf	21 sep ± 14,1	20 sep ± 10,0	20 sep ± 11,2	20 sep ± 10,7
Agen Double	26 sep ± 13,6	23 sep ± 10,4	22 sep ± 11,3	22 sep ± 10,5
Golden Drop	28 sep ± 14,1	26 sep ± 10,4	23 sep ± 10,4	22 sep ± 9,8
B. de Belgique	27 sep ± 12,2	27 sep ± 9,7	27 sep ± 9,8	27 sep ± 8,6
Reine - Claude	02 oct ± 12,6	01 oct ± 9,7	30 sep ± 9,5	30 sep ± 9,4
Perdrigon Janne	03 oct ± 20,4	06 oct ± 17,0	03 oct ± 16,7	03 oct ± 15,2
Promedios	16 sep ± 13,7	15 sep ± 11,2	14 sep ± 11,1	13 sep ± 10,5

### Información fenológica

La publicación de las observaciones fenológicas de cualquier tipo se realiza en formas variadas, de acuerdo a la característica de los datos, la urgencia de su conocimiento, el interés de los usuarios, etc.

De la misma forma que la presentación de datos meteorológicos y climáticos, la información fenológica puede referirse a datos de un mes o año particular, o expresar la ocurrencia de sucesos medios o normales.

La presentación de la información fenológica puede ser numérica (listados, tablas, boletines, etc.) o gráfica (diagramas, ilustraciones, cartas, etc.) siendo ésta última forma la preferida por suministrar visualización inmediata.

1. *Información numérica:* los valores anuales o promedios se presentan en tablas o planillas. Es la manera usada en los boletines y anuarios, donde se publican datos fenológicos de una red de observatorios y, generalmente, se los acompaña con la información simultánea de las variables meteorológicas (Cuadro XII.2)

Cuadro XII.2: Información Fenológica numérica (1968)

NOMBRE Y ESPECIE, nombre vulgar	FLOREACIÓN 1957-58			FENOS MEDIOS de			Desarrollo Algodonero			FECHAS DE FLOREACIÓN			
	J	F	P	J	F	P	J	F	P	Inicio	Fin	Fin	
1 ALGODONERO	24-E	5-E	14-E	31-VIII	10-IX	27-IX	1	14	24	26-VIII	30-IX	23-VIII	3-E
2 ALGODONERO ALBISIMO, azul del cielo	4-E	14-E	24-E	10-IX	15-IX	30-IX	10	9	33	30-E	3-E	24-E	4-E
3 ALGODONERO AZULADO, azul colorado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
4 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
5 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
6 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
7 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
8 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
9 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
10 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
11 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
12 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
13 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
14 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
15 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
16 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
17 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
18 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
19 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
20 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
21 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
22 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
23 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
24 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
25 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
26 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
27 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
28 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
29 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
30 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
31 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
32 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
33 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
34 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E
35 ALGODONERO AZULADO, azulado	10-E	19-E	29-E	16-IX	21-IX	30-IX	14	10	10	28-VIII	29-IX	30-IX	4-E

2. Información gráfica: las formas de presentación gráfica son muy diversas:  
 a. Espectros fenológicos: usados especialmente para comunidades vegetales, muestran la simultaneidad de comportamiento fenológico de varias especies en un lugar o región. Por ejemplo, los períodos de aparición y permanencia de malezas en los cultivos (Fig. XII.2), fases simultáneas de las especies de un bosque, etc.



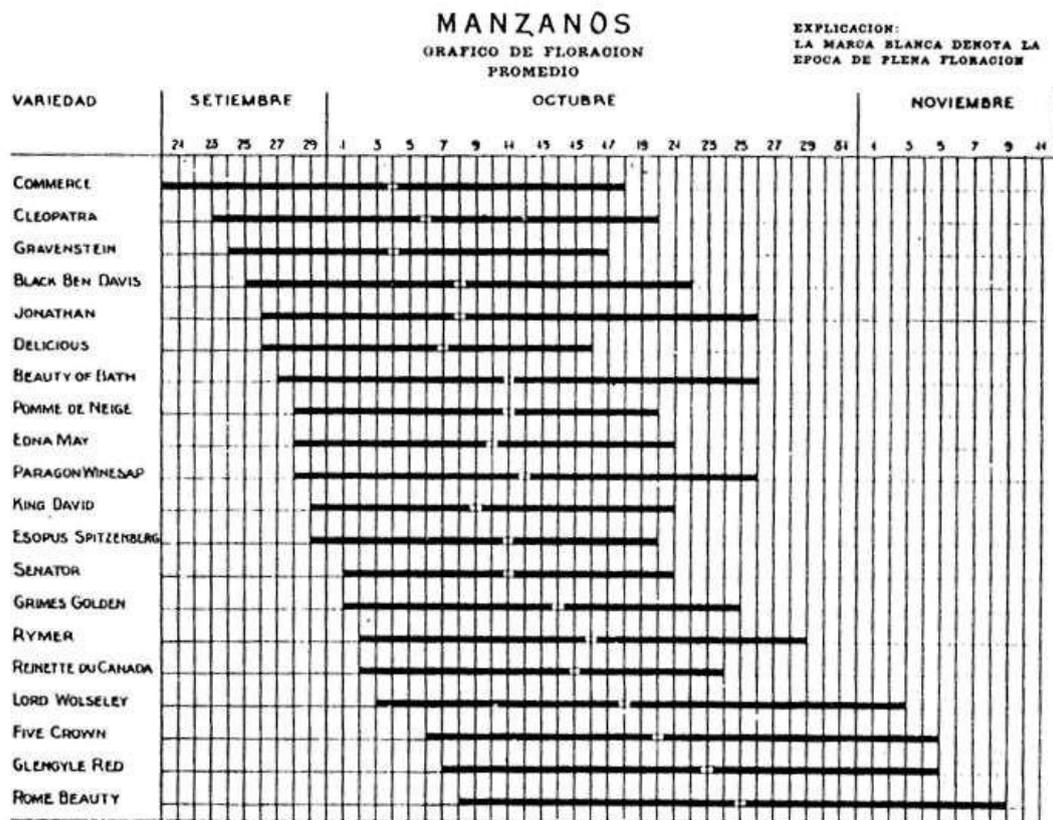


Figura XII.3: Secuencia fenológica de variedades de manzano en Mendoza (Estrada, 1932)

c. *Cartas fenológicas*: Consisten en la indicación sobre una carta geográfica de las fechas en que se observa la ocurrencia de una determinada fase o suceso fenológico. Las líneas trazadas uniendo los puntos del mapa donde las fases se registran en igual fecha, reciben el nombre de isofenas, y las referentes a fechas de floración se llaman "isoantes". Por convención, las isofenas, se trazan para los días 1<sup>o</sup>, 11 y 21 de cada mes. En las cartas se puede representar valores fenológicos de un año particular o los promedios de varios años (Fig. XII.4). A veces, en las cartas anuales, en lugar de representar las fechas, se representa la anomalía fenológica, es decir, la cantidad de días que en cada lugar el suceso se adelantó (expresión) o se atrasó (depresión) con respecto al valor promedio. En esos casos, las líneas se llaman isoanómalas.

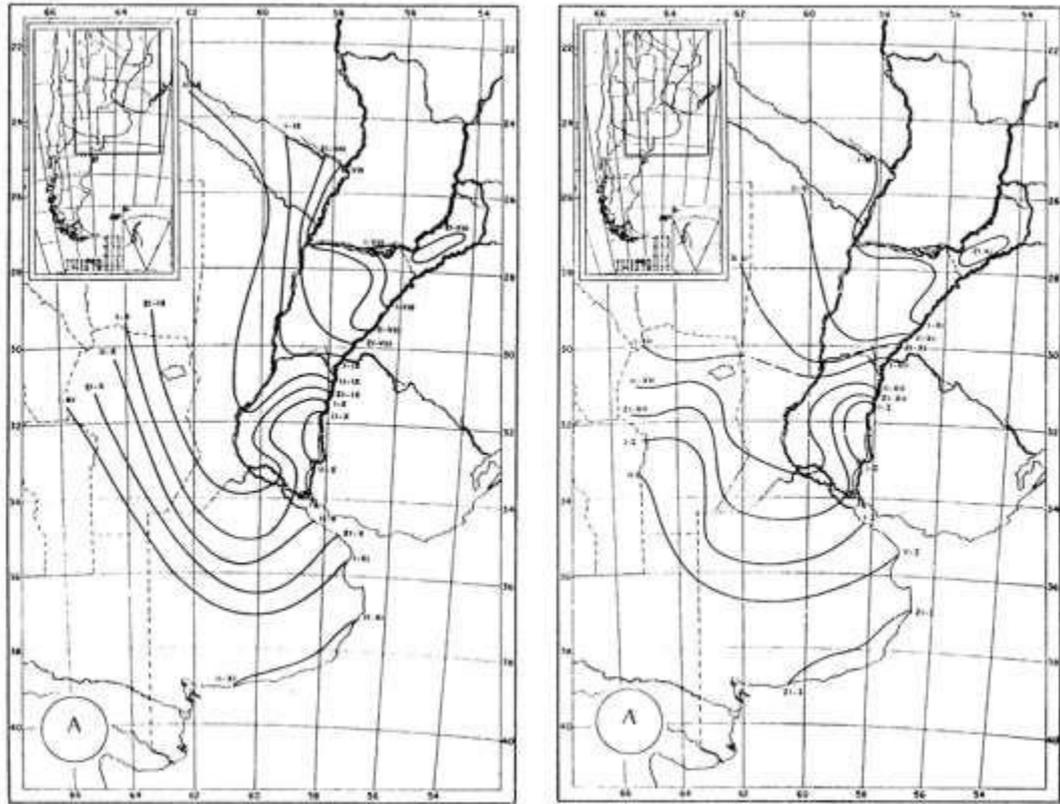


Figura XII.4: Cartas fenológicas. A: de siembra. B: panojamiento del maíz. (Pascale, 1963)

## 13 OBSERVACIÓN FENOLÓGICA

Antonio J. Pascale y Edmundo A. Damario

### 13.1 Observaciones fitofenológicas agrícolas

La Fenología Agrícola, como método de apoyo a la investigación bioclimática, debe establecer las normas de observación de observación fenológica, con el propósito de que su registro, en oportunidad y secuencia, sirva para reconocer sus exigencias bioclimáticas. La Organización Meteorológica Mundial fijó esas normas de observaciones biológicas en el Documento CAgM III de Toronto – Canadá. (Mallik *et al*, 1962). En ese documento se incluyeron los criterios y métodos de observación fenológica que atienden a las diferencias existentes entre los cultivos anuales y los perennes.

La reacción de las plantas de un cultivo agrícola se manifiesta por el desarrollo de un proceso fenológico siembra a cosecha en los anuales y durante todo el año en los perennes.

### Observaciones fenológicas en cultivos

#### 13.2. *En cultivos anuales*

La observación fenológica en cultivos anuales es más compleja que en los perennes, pues en estos últimos puede seguirse un método o norma general para todos, sin mayores dificultades.

Pero la mayor diferencia con los perennes radica en que en los cultivos anuales las fases se producen según haya sido la fecha de siembra. Cada época de siembra permite al cultivo integrar de manera distinta los componentes meteorológicos del complejo ambiental, dando como resultado una reacción diferente que se expresa por un proceso fásico particular, que deberá analizarse de manera especial según el cultivo considerado. Los cultivos perennes, al estar implantados en un lugar, solamente reaccionan a la marcha meteorológica del año, nunca tan variable como los complejos atmosféricos resultantes de épocas de siembra diferentes.

En los cultivos anuales pueden establecerse normas distintivas según las varias modalidades bioclimáticas: cultivos invernales, estivales, de media estación, más o menos sensibles a los descensos térmicos, con mayor o menor exigencia calórica, con distintos umbrales o tolerancia a la duración de día, variables necesidades en agua, etc. Estas diferentes modalidades características, determinan la necesidad de efectuar observaciones más detalladas en ciertos momentos fenológicos particulares o de fases y órganos que no son comunes a todas las especies.

Cuanto más detallada se efectúe la observación, tanto más fácil será sacar posteriormente conclusiones útiles para el cultivo de la especie. Durante el ciclo vegetativo de las plantas anuales, entre nacimiento y maduración de las semillas, se producen una serie de fases que limitan etapas con exigencias bioclimáticas distintas. Estas fases son similares en algunos vegetales y distintas en otros, por lo que es conveniente indicar las observaciones que deben tomarse, y la forma de hacerlo en aquellas cuyo registro no es fácil de interpretar.

No debe olvidarse que las observaciones fenológicas a campo con propósitos bioclimáticos difieren y son más reducidas en cantidad que las necesarias para otras disciplinas como Fisiología, Entomología, Fitopatología, etc., donde se estudian las causas internas de los procesos biológicos, diferenciación de cultivares, los estados propicios para la aparición de plagas y enfermedades, etc. En Bioclimatología Agrícola se observa como se manifiestan externamente el resultado de los procesos biológicos internos del vegetal. Por ello la observación fenológica es más simple y sin tanto detalle.

El número de días entre el comienzo y la finalización de cada fase, indica la forma en que la planta ha satisfecho sus necesidades bioclimáticas en el período vegetativo previo a la iniciación de dicha fase. Cuantos menos días transcurran, el cultivo habrá integrado más adecuadamente los elementos meteorológicos hasta ese momento. Este es el concepto de “energía de fase”.

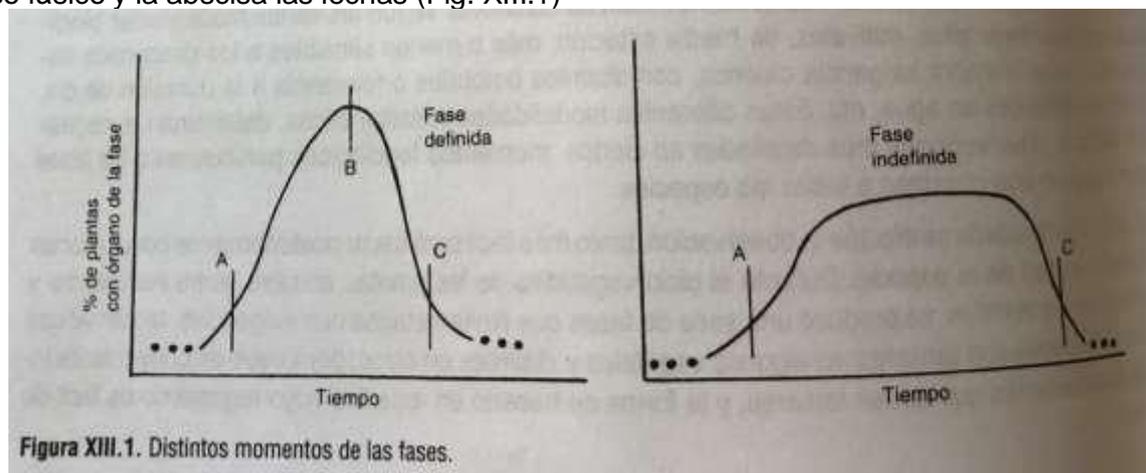
No todas las fases de un cultivo tienen importancia bioclimática como para observarlas íntegramente en todos sus momentos. Sólo se aplica el criterio de la duración en aquellas más importantes, tales como las que limitan el período de crecimiento con el de desarrollo, o que marcan la iniciación de un período de riesgo de daño por algún factor, etc. La floración es el período típico de fase a la que debe observarse por sus momentos fenológicos de comienzo, plenitud y fin, ya que la intensidad de esta fase es muy ilustrativa sobre la forma en que se desenvuelve la etapa de la reproducción, y su estudio detallado lleva al conocimiento de exigencias y tolerancias bioclimáticas.

Los criterios de observación que se desarrollan a continuación son aplicables a estudios experimentales realizados en parcelas de tamaño estándar, y diseño adecuado, pero son de fácil adaptación al gran cultivo, delimitando en su interior áreas reducidas para las observaciones fenológicas.

La observación de los momentos de comienzo, plenitud y fin de cada fase, puede realizarse en dos formas distintas:

- a) según que el cultivo cubra el terreno (cultivos densos) y sea dificultoso diferenciar las plantas separadamente, y
- b) según que se trate de cultivos que se siembran en líneas distanciadas que dejan terreno visible (cultivos ralos) en los cuales es fácil individualizar las plantas sobre la línea. Para este caso el recuento diario de las plantas “en fase” facilita, como se verá, la determinación objetiva de los momentos del proceso fenológico estudiado.

En ambos casos, puede asimilarse la observación a lo que sucede en una curva normal de frecuencias, donde la ordenada marca la intensidad de desarrollo del proceso fásico y la abscisa las fechas (Fig. XIII.1)



En la curva se pueden fijar tres puntos: A, B y C que se definen según que la observación se realice: en cultivos densos (a), ó en cultivos ralos (b).

*A – Comienzo de fase*

- a) Aparición en el cultivo de los primeros órganos de la fase que se suceden con otros, sin interrupción y en aumento.
- b) Aparecen los órganos de la fase en estudio en el 20% de las plantas.

### *B – Plenitud de fase*

- a) Momento en que visualmente puede decirse que el fenómeno tiene su máxima intensidad, determinado por la aparición subjetiva de que en ese día ha aparecido el mayor número de órganos posibles de encontrar que en cualquier otro lapso diario de la fase.
- b) Por recuento se determina que ha aparecido el 50% de los órganos de la fase.

### *C – Fin de fase*

- a) Últimos órganos de la fase sin interrumpir la continuidad del proceso correspondiente,
- b) El 80% de las plantas presenta los órganos de la fase en estudio.

Estos tres son los momentos fenológicos representativos de las fases, pudiéndose agregar, en determinados cultivos o en observaciones muy detalladas, las fechas de aparición de algunos órganos aislados al comienzo y al final de las mismas. Serían las observaciones ubicadas antes y después de los puntos A y C de la curva de frecuencias de la Fig. XIII.1.

*Primeros órganos:* Aparición de órganos aislados que no llegan a definir el comienzo del proceso fásico correspondiente.

*Últimos órganos:* Aparición de órganos aislados después del fin del proceso fásico correspondiente.

Esta observación de primeros y últimos órganos suele ser importante en ciertas circunstancias: a) por falta de energía de fase en especies que normalmente la producen en corto lapso, pero que por la incidencia inadecuada de factores meteorológicos alarga el proceso, por ejemplo la espigazón en trigo, y b) por la modalidad fenológica típica de aquellas especies, que posee algunas fases de larga duración.; casos típicos son: la floración y “bolilleo” del lino, la floración y maduración del tomate y arveja, etc.

En los casos de fases con buena “energía”, en especies que normalmente las cumplen en corto tiempo, la curva es empinada, con gran frecuencia diaria en la aparición de órganos, y la anotación de primeros y últimos órganos se confunde prácticamente con las fechas de comienzo y fin de fase.

En los cultivos ralos, es conveniente efectuar el recuento diario de las plantas que entran en fase. Sabiendo el número de plantas que se observa, es fácil graficar porcentualmente la marcha del proceso de floración.

A continuación se indican detalladamente las observaciones fenológicas a realizar en dos cultivos, uno denso y otro ralo, como ejemplo de las modalidades de observación enunciadas precedentemente.

### Observaciones fenológicas en trigo (cultivo denso)

*Siembra:* se anota la fecha.

*Nacimiento.* La aparición de las plantitas es la primera observación del ciclo pues la germinación se produce bajo tierra y no es posible registrarla a simple vista.

*Comienzo:* apreciación de que la aparición de plantitas se sucede sin interrupción y con ritmo creciente.

*Fin:* últimas plántulas que aparecen con ritmo ininterrumpido.

*Macollaje.* Es la aparición de tallo secundario por desarrollo de yemas laterales. Para esta observación puede notarse la fecha de aparición de la cuarta hojita, por ser más visible que los macollos laterales y de registro casi simultáneo.

*Comienzo:* apreciación de que las plantas tienen su cuarta hojita en una cantidad que supone la no interrupción del proceso.

*Encañazón.* Es una fase oculta que consiste en el registro de la aparición de la yema floral cuando ésta ha emergido a la superficie del suelo, en la parte superior de la futura caña que sustentará a la espiga. Es la observación macroscópica del primordio floral, directamente en el campo y corresponde a la apreciación microscópica de doble lomo o estado de cresta. La técnica observacional a campo es la siguiente: se corta el macollo al nivel del suelo y se le efectúa un corte longitudinal. Si sólo se encuentran hojas convolutadas, la planta aún está en etapa vegetativa; en cambio, cuando se puede detectar un internodio y sobre los nudos íntimamente unidos se ve la yema floral, la planta ha comenzado a encañar. A un centímetro sobre el suelo, la yemafloral tiene un largo entre 1 y 2 mm y se la puede observar a simple vista al hacer el corte del talluelo. Esta observación a campo de la encañazón requiere cierta práctica, pero cuando se está entrenado puede eliminarse el corte del macollo para su posterior hendidura longitudinal, por el tacto de la base del macollo; en este caso, si al apretarlo ligeramente al nivel del suelo se aprecia hueco, la planta ha comenzado a encañar.

*Comienzo:* por ser una observación difícil, se anota solamente la fecha cuando es posible registrar el pimpollo floral, en 3 de 5 plantas observadas según la técnica descrita

*Espigazón.* La observación deberá efectuarse cuando las espigas se desvainan de la última hoja que las envuelve y emergen sobre la caña

Comienzo	}	Según el criterio enunciado para el registro de momentos de las fases en cultivos densos.
Plenitud		
Fin		

*Floración.* Luego de la espigazón, la floración es una consecuencia inmediata, y se entiende por tal a la aparición de las anteras fuera de las espiguillas después de producida la fecundación, puesto que en el trigo existe cleistogamia.

Comienzo	}	Criterio enunciado para el registro de momentos de las fases en cultivos densos.
Fin		

*Maduración.* La fecundación trae como consecuencia la formación del grano, que aumenta de tamaño con sucesivas modificaciones en el contenido de agua y en transformaciones químicas, desde maduración verde, hasta maduración dura. Es conveniente distinguir las siguientes tres maduraciones:

*Comienzo de maduración lechosa:* los granos de las espigas al apretarlos entre los dedos liberan un líquido blancuzco. La observación de esta subfase coincide con el comienzo del amarillamiento de la planta de trigo.

*Comienzo de maduración cérea:* por el procedimiento anterior los granos pueden moldearse como si fuera cera.

*Comienzo de la maduración córnea:* los granos han perdido agua, tanto que no pueden hendirse con la uña.

*Cosecha:* dato sólo informativo, se anota la fecha.

En el caso de tener que ceñirse a lo más importante, las observaciones del proceso fásico de un cultivo de trigo pueden reducirse a: siembra, comienzo del nacimiento, comienzo de encañazón, comienzo de espigazón y fin de maduración cómea.

A continuación se presenta un registro modelo para observaciones fenológicas en trigo.

Variedad	Siembra	Nacimiento		Macollaje	Espigazón			Floración		Maduración			Cosecha
		Com.	Fin		Com.	Plen.	Fin	Com.	Fin	Lechosa	Cérea	Córnea	
				Com.						Com.	Com.		

### Observación fenológica en maíz (cultivo ralo)

#### *Siembra*

#### *Nacimiento*

*Comienzo:* puede adoptarse el criterio de observación subjetiva de intensidad de nacimiento, como en cultivos ralos.

#### *Fin* (ídem cultivos ralos)

*Macollaje.* Observación de si la planta forma macollos, dato que tiene valor para fines agronómicos. Como dentro de los cultivares que tienen tendencia a macollar no todas las plantas macollan, puede tomarse como límite, la fecha en que se encuentra el 20% de las plantas con macollos, e indicar aparte si el cultivar tiene más o menos de ese porcentaje.

*Panojamiento incipiente.* La panoja que se encontraba dentro de la caña, apenas asoma fuera de ella y comienza a visualizarse, sin necesidad de separar las hojas que la rodean.

*Comienzo:* en el 20% de las plantas la panoja comienza a emerger desde la hoja que la envuelve. No es necesario que la panoja supere la altura de la planta; su sola observación, aún mirando la planta desde arriba, es suficiente para contarla como panoja incipiente.

*Plenitud:* el 50% de las plantas tienen panojas incipientes.

*Polinización.* Indica el momento que el aire comienza a tener polen de las plantas en observación, con posibilidad de adherirse a estigmas cercanos. Esta observación es posterior al panojamiento incipiente en aproximadamente 7 a 12 días, dependiendo del cultivar, época de siembra y características del año.

Comienzo	}	Respectivamente, el 20% y el 80% de las plantas liberan polen de sus panojas, lo que se comprueba moviéndolas.
Fin		

**Espigazón.** La salida de los estigmas fuera de la espiga se produce normalmente entre 2 y 5 días después del comienzo de la polinización.

Comienzo	}	Respectivamente el 20% y el 80% de las plantas muestran los estigmas saliendo fuera de la futura espiga.
Fin		

**Maduración.**

**Comienzo de maduración lechosa:** en el 20% de las plantas, al apretar los granos se libera un líquido blancuzco. Existe una correspondencia en el amarillamiento de la bráctea (chala) de la espiga con esta subfase de la maduración. Puede evitarse entonces romper los granos, recontando el 20% de las plantas cuyas espigas comienzan a amarillear.

**Fin de maduración córnea:** en el 80% de las plantas, los granos de las espigas no pueden hendirse con la uña.

**Cosecha**

Para observaciones fenológicas menos detalladas, pueden registrarse solamente las fechas de los siguientes momentos: siembra, comienzo de nacimiento, 20% de las plantas con panojamiento incipiente, 20% de plantas liberando polen, 20% de plantas con estigmas visibles y 80% de plantas con maduración córnea.

A continuación se presenta un modelo de registro para observaciones fenológicas en maíz.

Variedad	Siembra	Nacimiento		Número de plantas			Macollaje	Panojamiento incipiente			Polinización		Espigazón		Maduración		Cosecha		
		Com.	Fin	Total	Com. 20%	Plen. 50%		Fin. 80%	Com. 20%	Com. 20%	Plen. 50%	Com. 20%	Fin 80%	Com. 20%	Fin 80%	Lecho-sa		Córnea	
																Com. 20%		Fin 80%	

Para el registro de observaciones de fases en cultivos ralos donde se requiere la anotación de fechas en que se producen diferentes porcentajes de aparición de órganos, cualquier observador ubicará la misma fecha pues se elimina el factor personal. Solamente influye la frecuencia en la realización de las observaciones. Sin embargo, con recuentos cada 2 ó 3 días como máximo, es posible luego en gabinete integrar la curva de porcentaje diario de aparición de órganos, utilizando una planilla semejante a la siguiente referida al desarrollo de la fase de panojamiento incipiente de una parcela de maíz con 74 plantas.

Enero												
Fechas	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Recuento	2	-	14	-	-	48	-	64	-	-	72	74
Observadas	2	-	12	-	-	34	-	16	-	-	8	2
Calculadas	2	4	8	8	10	16	10	6	4	2	2	2
% diario	2,7	5,4	10,8	10,8	13,5	21,6	13,5	8,1	5,4	2,7	2,7	2,7
% acumulado	2,7	8,1	18,9	29,7	43,2	64,8	78,3	86,4	91,8	94,5	97,2	99,9

El comienzo de panojamiento en esta observación corresponde a: Comienzo: 4 ó 5 de enero; Plenitud: 6 ó 7 de enero y Fin: 8 ó 9 de enero. La fecha a anotar diferirá en un día según que las observaciones se realizaran durante horas de la mañana o la tarde, ya que los porcentajes se acumulan de distinta forma.

### **13.3. En cultivos perennes**

La observación fenológica en plantas perennes se efectúa sobre individuos que aisladamente cada uno de ellos representa una repetición. Para obtener promedios fenológicos correctos, es suficiente observar de 3 a 5 árboles frutales, forestales o arbustos, de la misma edad y ubicados respectivamente dentro del monte frutal, el bosque o la plantación, preferentemente en el centro. Plantas únicas también pueden observarse fenológicamente cuando se encuentran consociadas con otras en un parque o jardín botánico y se pretende conocer las variaciones microclimáticas de ese lugar en comparación con áreas de mayor superficie.

Según el propósito que se persiga en un plan de observaciones fenológicas con plantas perennes será el criterio observacional o el ajuste del método que se aplique, tendiendo siempre a magnificar la o las fases, que más interesen en el estudio.

a. Para una explicación de las consecuencias del régimen meteorológico anual sobre el crecimiento y desarrollo de los seres vivos, interesa registrar:

-En regímenes climáticos definidos, donde el proceso fenológico sigue un ritmo acorde con el ritmo meteorológico, se observarán sólo momentos representativos de las fases; por ejemplo: comienzo de brotación, comienzo de floración, plenitud de maduración del fruto, plenitud de caída de hojas, etc., datos que se utilizan para la confección de Boletines Fenológicos o para la caracterización bioclimática de las estaciones del año por medio de plantas especialmente elegidas.

-En regímenes climáticos variables, donde el ritmo fenológico sufre intercepciones con el ritmo meteorológico y entre sus fases, es imprescindible efectuar observaciones simultáneas del estado de desarrollo de todas las fases visibles del individuo.

b. Cuando se pretende estudiar las exigencias bioclimáticas de una especie o variedades de una especie, es necesario registrar no sólo la iniciación de las fases, sino también la intensidad y duración de las mismas

### **Observaciones fenométricas.**

Para algunos investigadores, el ámbito de estudio de la Fenología se refiere a los fenómenos biológicos periódicos totales, es decir, visibles o no. Esta concepción introduce un importante cambio en la índole de la disciplina fenológica, incluyendo el estudio de ciertos hechos que, como las modificaciones bioquímicas internas en la constitución y cantidad de sustancias (almidones, azúcares, alcaloides, esencias, aceite, taninos, etc.), el aumento de peso o la acumulación de materia seca, etc., no son externamente visibles y, además, no siempre coinciden con cambios en la presentación externa del individuo, por lo que no pueden ser considerados como "fases fenológicas".

Son observaciones fenométricas, por ejemplo, la medición periódica de: altura de plantas, engrosamiento de ramas y ramitas, relación parte aérea-parte subterránea, aumento de peso y tamaño en frutos, aumento de la superficie foliar, incremento del contenido de sustancias varias, etc.

Este tipo de observaciones ayuda a explicar el comportamiento de los cultivos y, especialmente, sirven para analizar el resultado final, el rendimiento cuali y cuantitativo, pero no aportan utilidad en la explicación biometeorológica del proceso fásico, es decir, en la investigación de las exigencias y tolerancias meteorológicas de las fases y los subperíodos.

## Observaciones fenológicas fitosanitarias

Las actividades agrometeorológicas sobre protección de los cultivos contra el daño de enfermedades y plagas, requiere del conocimiento de la influencia de las condiciones meteorológicas en su aparición y desarrollo.. Para ello, es necesario que se realicen las correspondientes observaciones sobre el daño y su intensidad, y sobre el ciclo de la enfermedad o peste, las que pasan a ser complementarias de las puramente fitofenológicas.

Interesa indicar pormenorizadamente el estado fenológico de la planta en el momento en que se nota el comienzo del ataque. Producida la infestación, el seguimiento periódico de la intensidad del daño, proveerá información útil para relacionarlo con la influencia de las condiciones meteorológicas. La intensidad del ataque se puede graduar de acuerdo a una escala, como la siguiente:

1. Observación de ataque en pocas plantas aisladas
2. Ataque débil: hasta el 10 % de las plantas atacadas
3. Ataque mediano: hasta el 20%
4. Ataque fuerte: hasta el 50%
5. Ataque muy fuerte: más del 50%

Para algunas enfermedades, las que comúnmente son producidas por hongos o virus, se han propuesto escalas de afectación como por ejemplo, la del mildew de los cereales y la roya del trigo.

Cuando el daño es producido por insectos u otros animales parásitos, no sólo puede ser cuantificado el momento y la intensidad del daño, sino también las varias etapas de su desarrollo (postura de huevos, pupación, etapa del vuelo,etc).

## Observaciones fenológicas detalladas

### 13.4. En cultivos anuales

Para aplicación de las observaciones fenológicas a otros propósitos, tales como las referentes a estudios fisiológicos, entorno y fitopatológicos, de tratamientos fitosanitarios, etc., se han propuesto programas o sistemas observacionales mucho más detallados y precisos, los cuales suelen comprender no solamente las pautas fásicas, sino que además modulan situaciones de puro crecimiento.

Un ejemplo de programas de este tipo es el Código Decimal desarrollado por Tottman y Makepeace (1979), para cereales invernales. En su clave tienen en cuenta diez estados de evolución, a saber: 0-germinación; 1- nacimiento; 2-macollaje; 3- alargamiento de talluelos; 4- encañazón; 5-inflorescencia; 6-antesis; 7-maduración blanda; 8- m. cerosa; 9- m. final. Dentro de cada estado distinguen diez momentos de acuerdo al grado de cumplimiento, registrando simultáneamente los diversos momentos en cada estado de la clave (Fig. XIII.2)

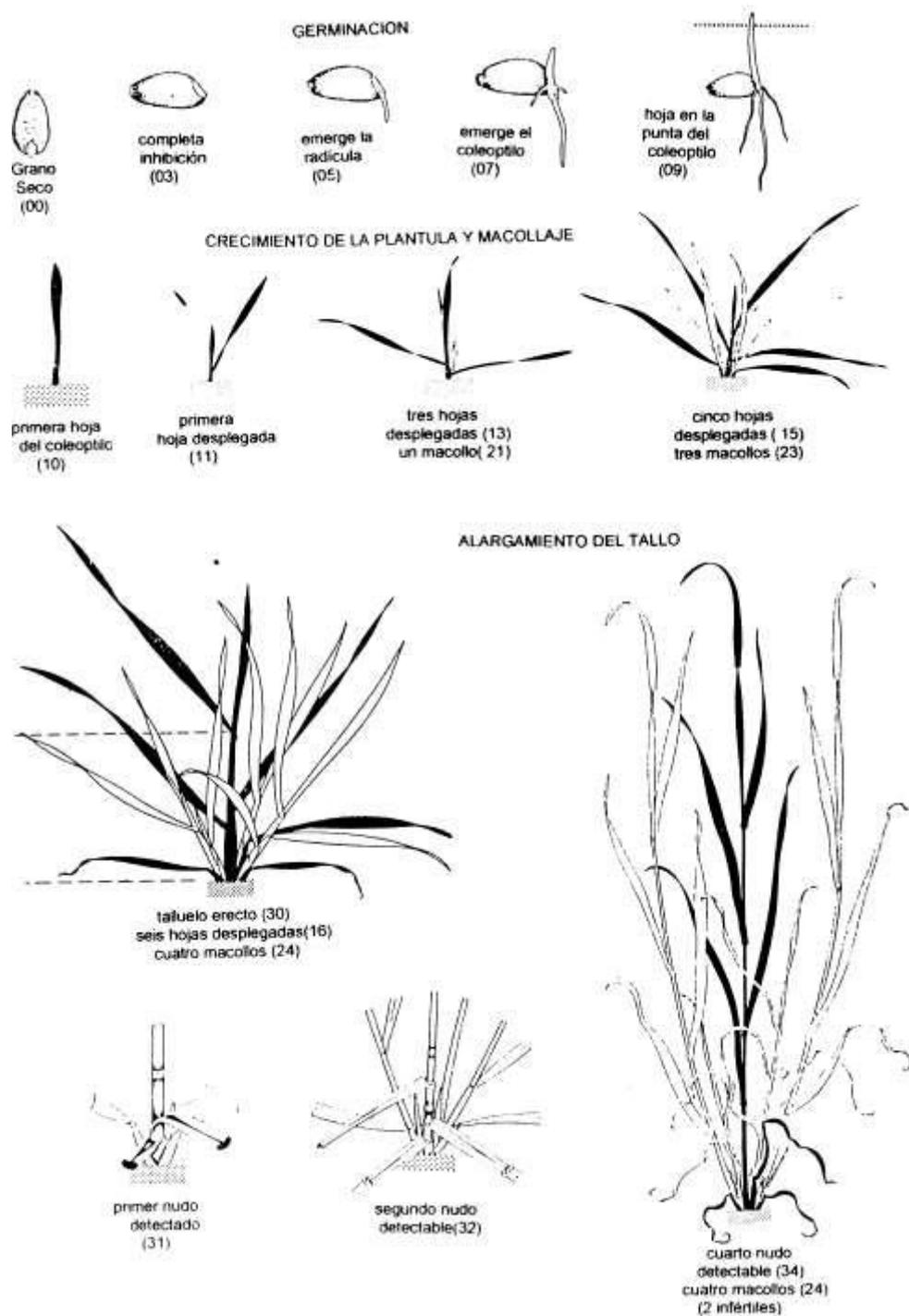


Figura XIII 2 a: Estado del desarrollo del trigo. (Tottman y Makepeace, 1979)

Otros ejemplos sobre cultivos herbáceas son, entre otros, los de Large (1954); Haun (1973), y Zadoks *et al* (1974) para cereales; los de Pauli *et al* (1963); Vanderlip y Reeves (1972) y Schneiter y Millar (1981) para sorgo; el de Hanway (1966) para maíz; el de Eisner *et al* (1974) para algodón; el de Heatcole (1964) para remolacha azucarera y el de Fehr y Caviness (1977) para soja.

Este último, establece escalas diferentes para los estados vegetativos y los reproductivos del cultivo (Fig. XIII.3 a y b).

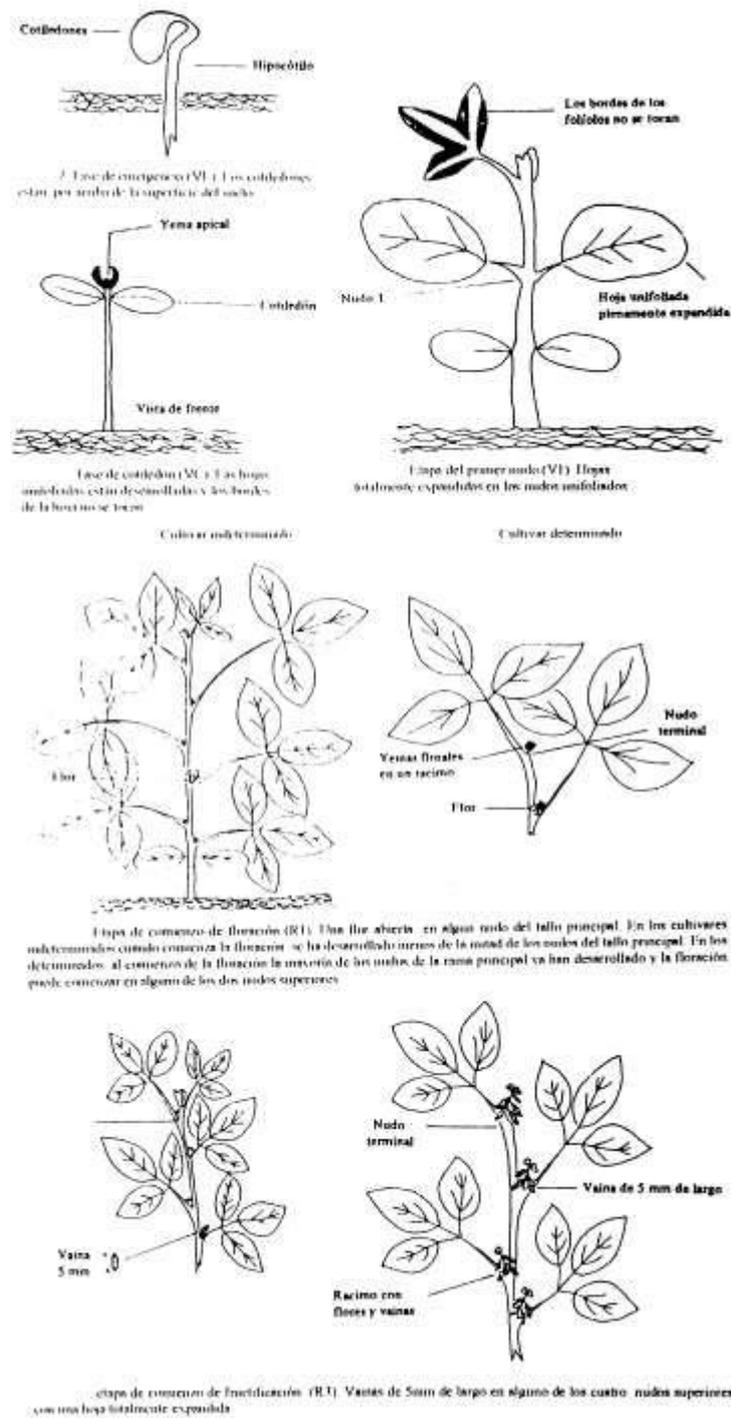
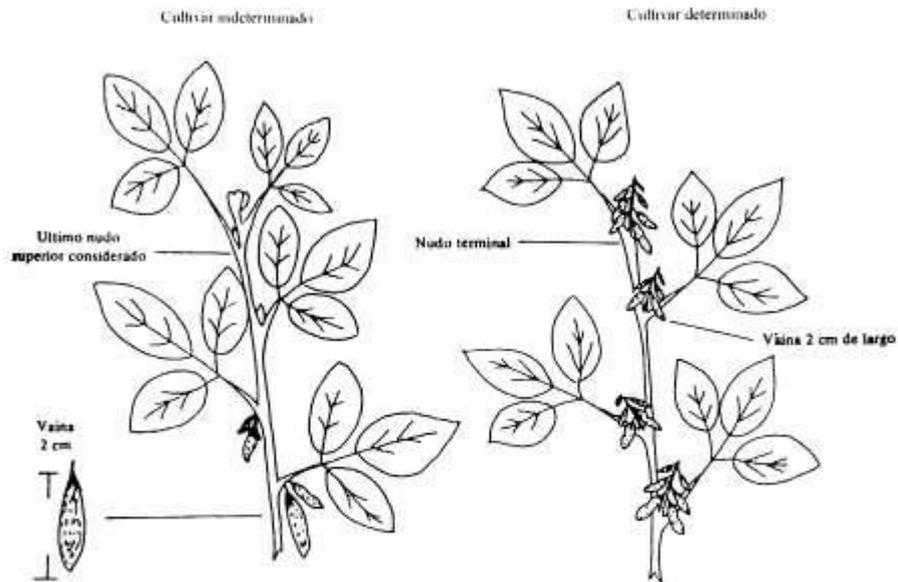
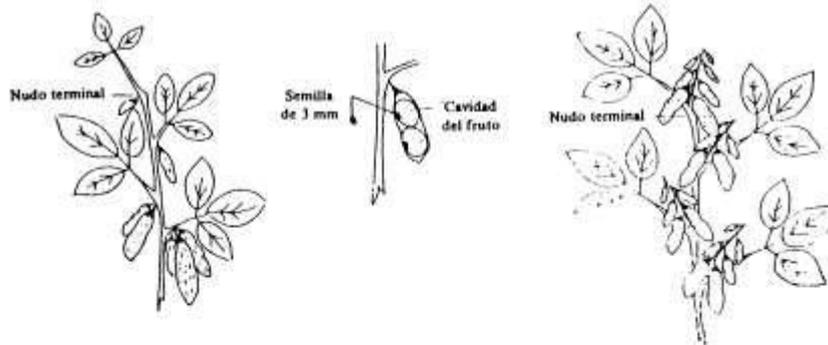


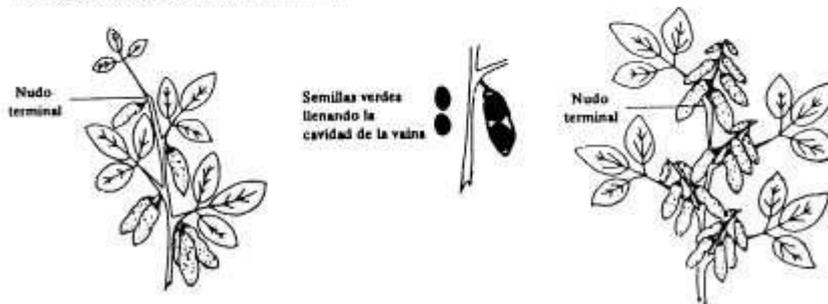
Figura XIII. 3 a: Estado vegetativo y reproductivo de la soja.



Estado de plena fructificación (R4) Vainas de 2 cm de largo en uno de los cuatro nudos superiores a la rama principal con una hoja totalmente expandida.



Fase de comienzo de llenado de granos (R5) Las semillas tienen 3mm de largo en uno de los frutos de los 4 nudos superiores que tienen 1 hoja plenamente expandida.



Fase de tamaño máximo de los granos (R6) La cavidad de las vainas totalmente llena con las semillas verdes en alguno de los cuatro nudos superiores de la rama principal con hojas totalmente desarrolladas.

Figura XIII. 3 b: Estado vegetativo y reproductivo de la soja.

Las etapas vegetativas se describen a partir del momento en que la planta emerge (VE) del suelo. Después del estado cotiledonal (VC) se comienza a contar los nudos, empezando por los nudos unifoliados (V1, V2, V3.....Vn) solamente en el tallo principal y no en las ramas laterales. Las etapas reproductivas se basan en la floración, el crecimiento de las vainas y de las semillas y en la madurez de la planta, indicándose las etapas con letras R. Así R1 indica el estado de comienzo de floración, por una flor abierta en cualquier nudo; R2, plena floración; R3 es el comienzo de fructificación, cuando se aprecian vainas de 5mm de largo en alguno de los cuatro nudos superiores; R4 es la plena fructificación de vainas ya de 2cm en los mismos

nudos; R5 marca el momento de comienzo de formación de las semillas que alcanzan a los 3mm de largo en alguno de los cuatro nudos; R6, marca el tamaño máximo de las semillas; R7 es el comienzo de la maduración y, por fin, R8 señala la plena madurez, cuando el 95% de las vainas tiene el color típico de la maduración.

## 2. En cultivos perennes

### A) En forestales y ornamentales

Para un registro fenológico con un mayor detalle que la simple observación de los momentos de las fases, se han propuesto varios métodos de observación entre los cuales puede citarse el Registro Fitofenológico Integral (Ledesma, 1953) aplicable a cualquier especie perenne pero específico para forestales y ornamentales.

#### Registro Fitofenológico Integral.

La particularidad de este tipo de registro es que cada observación consiste en la apreciación de la actividad visible total de la planta y la intensidad con que se van produciendo, o terminando, los diversos sucesos fenológicos, para todo lo cual se dispone de una forma de anotación original. El Registro consiste en:

- Observaciones regulares cada 5,7 o 10 días, dependiendo de la mayor o menor actividad fenológica.
- La planilla de anotación consiste en una serie de cuadraditos consecutivos (Cuadro) de 10 a 12mm de lado, con una prolongación en la parte superior para anotar la fecha de la observación.
- Cada lado del cuadradito está destinado al registro de una fase dada. Así:

El lado 1	a la floración y maduración de fruto
El lado 2	a la brotación y crecimiento de tallos
El lado 3	al cambio de color de hojas y frutos
El lado 4	a la caída de hojas y caída de frutos.

#### c) los distintos órganos se representan por signos convencionales, a saber:

. (punto)	proceso en preparación o parcialmente cumplido
- (guión liso)	para todos los órganos, menos el fruto
~ (guión ondulado)	para el fruto
<b>m</b> (letra m)	para indicar presencia de fruto maduro
<b>v</b> (letra v)	para indicar fruto verde presente

e) La intensidad de los procesos observados se cuantifica por el número de signos, desde ninguno, indicado por un cero (0) correspondiente a inactividad fenológica en esa fase o en el comportamiento total del individuo, en cuyo caso el cero se ubica en el centro del cuadradito, hasta cinco signos indicando la máxima intensidad de actividad del proceso.

f) La actividad de las fases, o sea, la intensidad del proceso, avanza según la dirección indicada por las flechas en el cuadradito.

El esquema general indicado en la figura XIII.4 muestra el proceso de registro en cada fase y los momentos fenológicos que se corresponden con la intensidad anotada del proceso y en el Cuadro XIII.1 se reproduce una observación completa durante un año de observación en *Aesculus hippocastanum*.

	PROCESOS PREPARATORIOS	PRIMEROS ORGANOS AISLADOS	COMIENZO DE LA FASE	PLENA INTENSIDAD	FIN DE LA FASE	ULTIMOS ORGANOS AISLADOS	ORGANOS EN DESCANSO
BROTACIÓN	.....	.....	.....		.....	.....	o
FLORACIÓN	.....	.....	.....		.....	.....	o
MADURACIÓN DEL FRUTO	.....	.....	.....		.....	.....	o
AMARILLEO O CAMBIO DE COLOR DEL FOLLAJE		.....	.....		.....	.....	o
CAIDA DEL FOLLAJE		.....	.....		.....	.....	o
CAIDA DEL FRUTO		.....	.....		.....	.....	o

Figura XIII. 4: Proceso de registro de los momentos de cada fase, en el registro Fitofenológico Integral de Ledesma (Ledesma, 1953)

Cuadro XIII.1: Observación Fenológica completa según el método de Ledesma en *Aesculus hippocastanum* (periodo 1947/1948)



F1: hasta tres flores abiertas;  
 F2: plena floración, todas las flores del ramillete abiertas;  
 G. caen los primeros pétalos  
 H. caen los últimos pétalos.  
 I- desarrollo de los ovarios y raleo;  
 J- crecimiento de los frutos  
 Entre uno y otro proceso, los momentos intermedios se anotan con números  
 indicativos de la intensidad de cumplimiento.

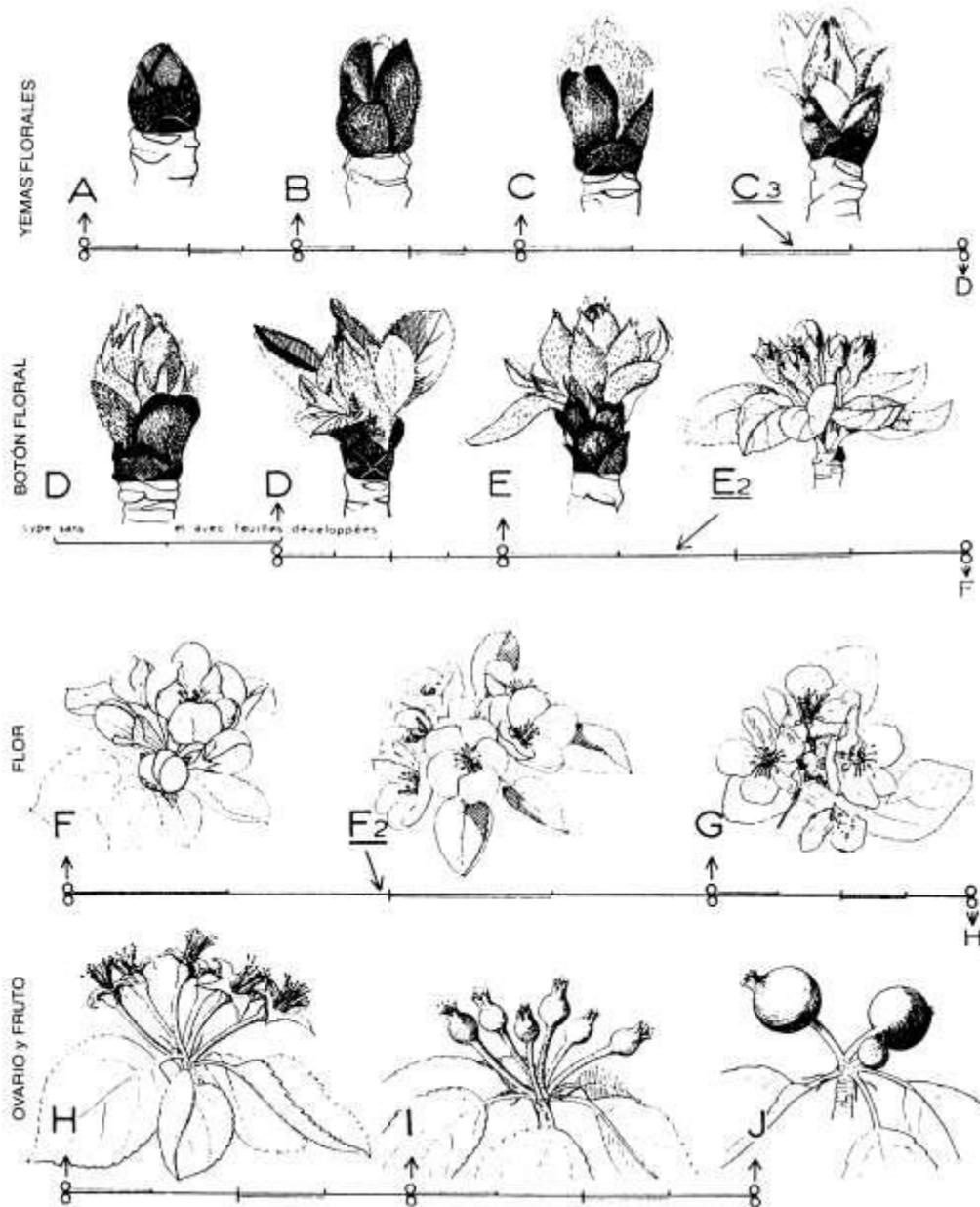


Figura XIII.5: Estado fenológico detallado del manzano (Fleckinger, 1948)

## 14. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN EN BIOCLIMATOLOGÍA AGRÍCOLA Y AGROCLIMATOLOGÍA

Antonio J. Pascale y Edmundo A. Damario

### 14.1 Métodos en Bioclimatología Agrícola

Como fue mencionado, la Bioclimatología Agrícola es una disciplina esencialmente "de campo", que trata de explicar las reacciones de los cultivos a los factores meteorológicos en su particular ubicación geográfica, por lo cual, en el área de su dispersión cultural existirán tantos comportamientos biológicos como combinaciones de factores incidan durante su ciclo de vida.

Para el conocimiento de tales comportamientos, esta disciplina dispone de varios métodos de acción en condiciones naturales o en laboratorio. El método de investigación bioclimático fundamental deberá basarse en una técnica que utilice los ensayos experimentales "a campo", aunque pueden provocarse reacciones especiales con tratamientos artificiales previos a la siembra o durante el ciclo vegetativo. El comportamiento de un cultivo frente a los elementos físicos del ambiente natural, puede conducir al conocimiento de las causas determinantes de las variaciones del proceso fásico. Un método que se basara exclusivamente en las reacciones de un material cultivado en una cámara climática, por más perfecta que ésta sea, adolecerá de limitaciones al compararlo con su comportamiento en un ambiente natural. "El conjunto de condiciones ambientales es irreproducible en una cámara climática y, por ello, los resultados obtenidos en ella, debe confrontarse con investigaciones a campo, donde la respuesta del cultivo es el resultado de los múltiples factores climáticos considerados globalmente" (Mattei, 1973). A continuación se describen los diferentes métodos que son utilizados para investigaciones en Bioclimatología Agrícola.

#### Métodos experimentales "a campo"

##### a) Ensayos geográficos.

Si fuera posible realizar ensayos de un cultivo en cada uno de los lugares de su área de dispersión mundial, en un sólo año de observaciones fenológicas y fenométricas se obtendría un panorama completo ante todas las combinaciones ambientales que influyeron sobre su crecimiento y desarrollo. Esto es impracticable pero, aún con pocas ubicaciones geográficas, convenientemente elegidas, se consigue exponer el cultivo a variadas condiciones meteorológicas y, por sus reacciones, se pueden inferir conclusiones bioclimáticas correctas.

Una de las primeras referencias a la utilización de este método, fue el experimento de siembras geográfica través del dilatado territorio de Rusia, realizado por Vavilov en 1923, utilizando numerosas especies y entre ellas 33 trigos primaverales y 10 otoñales (Vavilov, 1926).

Este sistema de investigación, si bien consigue utilizar un gigantesco laboratorio natural, incluye también suelos diferentes, técnicas culturales y factores personales de observación, muchas veces no homogéneos. Por estos motivos, más que un método bioclimático se lo puede considerar como de investigación ecológica ya que, además de los otros factores, incluye al suelo, que aunque no puede modificar sustancialmente el comportamiento fenológico, si influye en el rendimiento final.

Cuando el ensayo geográfico se maneja criteriosamente, tratando de eliminar al máximo las interferencias indeseables de factores no meteorológicos, y se repite varios años para conseguir la multiplicidad de estas condiciones, se obtienen resultados excelentes.

A modo de ejemplo puede mencionarse un experimento del que participó la Argentina: Robertson (1968), analizó el comportamiento del trigo Marquis en un

ensayo geográfico, con siembras en nueve estaciones experimentales de Canadá, ubicadas entre los 42° y los 62° de latitud norte. Con los valores fenológicos y fenométricos obtenidos durante los años 1953 a 1957, desarrolló una ecuación matemática que relaciona la influencia de las temperaturas diurnas y nocturnas con el fotoperíodo de cada uno de los subperiodos desde siembra a cosecha. En una etapa siguiente confirmó la validez de su fórmula mediante la realización de otros cinco años de ensayos (período 1958/62) en los mismos nueve puntos canadienses, y durante el periodo 1961/65 de siembras con el agregado de Buenos Aires (Facultad de Agronomía), con el objeto de exponer al trigo Marquis a condiciones térmicas y fotoperiódicas totalmente diferentes a las de su cultivo en Canadá. El resultado confirmó la superioridad de la fórmula, designada como "modelo tricadrático", frente a otros modelos de análisis como: velocidad de desarrollo, unidades calóricas, unidades fototérmicas, etc, al explicar con el menor grado de error la influencia del ambiente sobre el proceso fásico del cultivo de trigo Marquis.

Este estudio experimental respondió plenamente a los requisitos de la investigación en Bioclimatología Agrícola, como la reacción del cultivo frente a complejos ambientales naturales diferentes, y por realizarse durante muchos años, explicó la interacción de los elementos bioclimáticos en los distintos subperiodos del cultivo, aún en suelos diferentes.

b) Las siembras periódicas continuadas.

Este método consiste en efectuar siembras periódicas del cultivo en experimentación separadas entre sí en una cierta cantidad de días, durante un período de tiempo que exceda, antes y después al período normal de siembra del lugar. Es recomendable, aunque no imprescindible, que el ensayo se realice con parcelas de tamaño estándar y con diseño experimental a elección.

La siembra continuada de especies anuales también permite establecer la época de siembra que integra más correctamente los elementos agroclimáticos disponibles para producir el mayor rendimiento. Estudios de este tipo realizados en el sur de Brasil (da Mota y Garcés, 1974) pusieron en evidencia la época de siembra óptima para cultivos de trigo, maíz, sorgo, poroto, arveja y maní, los que al estar distribuidos a lo largo del año, revelan como cada especie integró las disponibilidades climáticas según sus requerimientos particulares. (Fig. XIV.1)

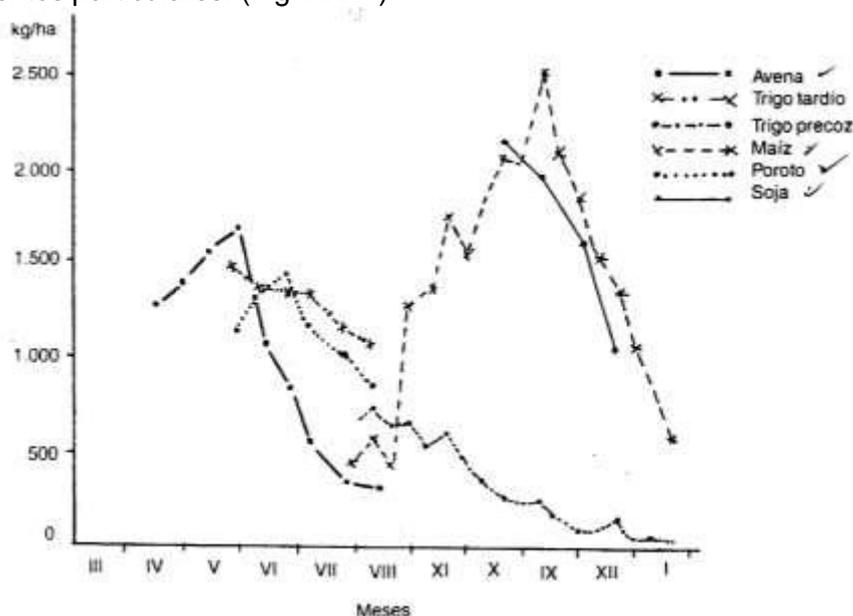


Figura XIV.1: Rendimientos medios de avena, trigo precoz y tardío, poroto y soja sembrado en Diferentes fechas (Mota da e Garcés, 1974)

### Técnica de la vernalización

Los ensayos a campo con cereales invernales permiten asimismo estudiar la exigencia en frío de los cultivares cuando se realizan siembras con material vernalizado artificialmente, es decir, inducir su exigencia en el estado de semilla.

La vernalización es un método de laboratorio introducido por Lysenko (1928) que se utiliza en las siembras continuadas con la finalidad de poner de manifiesto las necesidades de enfriamiento requeridas por un cultivo en la etapa de crecimiento. Este método artificial fue utilizado en la Argentina siguiendo el siguiente procedimiento:

- a) las semillas a vernalizar se ponen a remojar durante 24 horas;
- b) posteriormente se las seca sobre papel absorbente, y se mantienen a temperatura de laboratorio (15-20° C) hasta germinación incipiente;
- c) se interrumpe el crecimiento de las radículas llevando el material a heladera a temperatura de 1 a 7°C, donde se las deja una variable cantidad de días.

Si la vernalización se realizó adecuadamente, las semillas pregerminadas y enfriadas, producirán plántulas con su exigencia en frío totalmente satisfecha. La precocidad que se manifieste en las reacciones de las plantas vernalizadas en las diferentes épocas de siembra indicará la intensidad requerida de este factor bioclimático.

Si lo que se busca con la vernalización es revelar la exigencia desconocida de frío de nuevos cultivares, puede seguirse el procedimiento siguiente:

- a) Se establece una fecha de siembra a campo después de la cual el material investigado no disponga naturalmente de frío, por ejemplo, durante septiembre para Buenos Aires.
- b) Desde 35 o 40 días antes de esa fecha se comienzan a vernalizar muestras del material cada 5 o 6 días.

c) Todas las muestras con distinto período de vernalización de siembran en la fecha elegida, conjuntamente con material pregerminado pero no verbalizado que servirá como testigo.

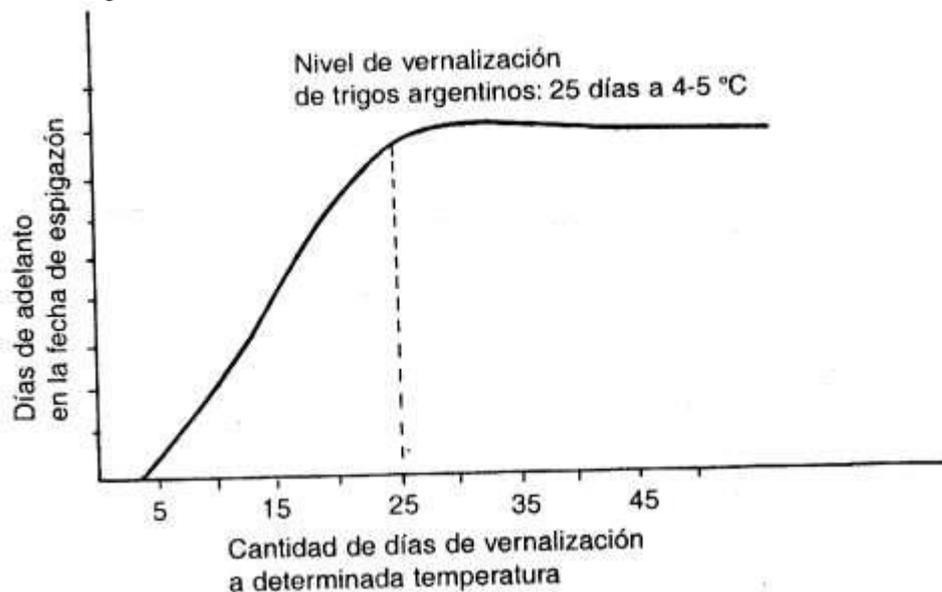


Fig. XIV.2: Esquema para la determinación de las exigencias en frío en cereales invernales para cada temperatura de tratamiento vernalizante.

Para árboles frutales, la determinación de la exigencia en horas de frío por debajo de 7°C (vernalización) se mencionan los métodos de Yarnell (1939) y el de Tabuenca (1972). Para el primero, en otoño, cuando las plantas empiezan su descanso, se cortan estacas que se colocan en heladera a temperaturas inferiores a 7°C, de donde se sacan a intervalos de 50 horas y se las coloca en recipientes con sustancias nutritivas a temperatura de laboratorio (25°C). La extracción que florezca en el menor número de días marcará el grado de requerimiento en frío del cultivo.

El otro método, el de Tabuenca, es una variante del anterior pero sin recurrir a la utilización de heladera pues, directamente desde el campo se van realizando periódicamente extracciones de ramitas con creciente cantidad de horas de frío acumuladas a medida que avanza el invierno. Esas ramas se colocan en recipientes con agua durante una semana en ambiente de 20°-25° de temperatura. A la semana se le sacan 50 yemas a las ramitas y se desecan a estufa a 70° y se pesan. Mientras no satisfagan su exigencia en frío las muestras tendrán peso idéntico, para comencera aumentar cuando se rompe el período de descanso.

La desventaja de este método es que no pueden determinarse exigencias en frío de cultivares que requieran mayor enfriamiento que el que puede proporcionarle naturalmente el ambiente.

#### c) Las siembras continuadas en ensayos geográficos

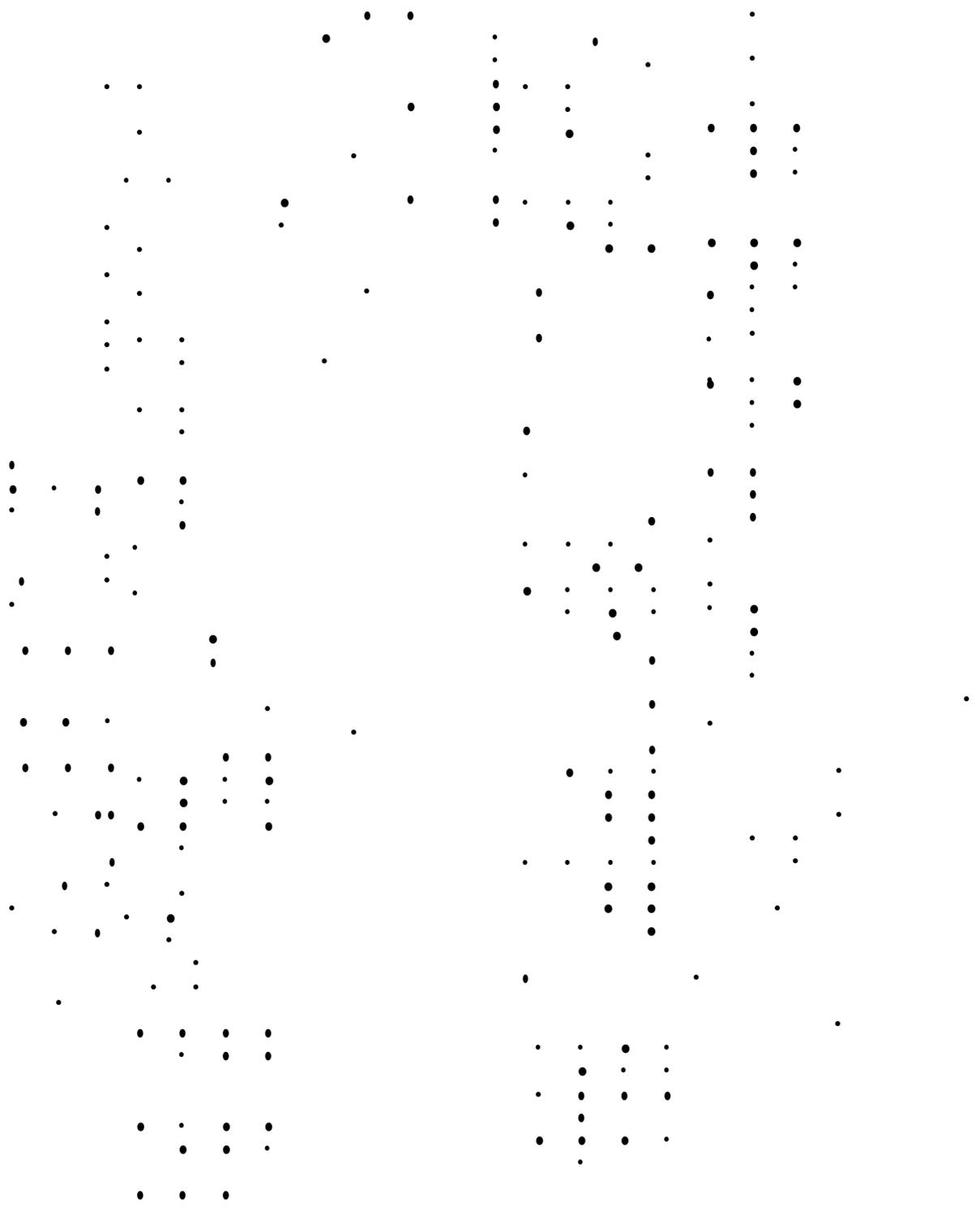
Las ventajas que aisladamente se logran con los ensayos geográficos y con las siembras continuadas, se suman si se realizan ambos sistemas en forma conjunta. Es el método a campo que consigue en un solo año, mayor cantidad de combinaciones de elementos bioclimáticos accionando sobre los cultivares de una especie. Si se efectuaran siembras de un cultivar de trigo, cada 15 días durante 5 meses en 5 localidades distantes, con material testigo y vernalizado, se lograrían 50 combinaciones, con las cuales caracterizar las exigencias bioclimáticas de ese cultivar. Con este método se realizó en 1966 un ensayo geográfico internacional entre Brasil (Estación Experimental de Pelotas) y la Argentina (Facultad de Agronomía de Buenos Aires), en el que además de los trigos brasileros, se utilizaron cuatro argentinos de

comparación. Pudo aconsejarse sobre épocas de siembra óptimas y cultivares convenientes para ese ambiente regional triguero del sur de Brasil.

En el estudio agroclimático para introducir el cultivo de la soja en la Argentina, el método utilizado fue el geográfico con dos o tres épocas de siembra en 31 sitios del territorio, durante 6 períodos agrícolas, con una extensa lista de cultivares o selecciones, para determinar el mejor momento de iniciación del cultivo en cada lugar. En el Cuadro XIV.1 se observa, en el amplio rango latitudinal desde 25° a 41°, que el ciclo varió entre 81 y 180 días, demostrando la gran oferta genética de la especie y las disímiles combinaciones de complejos ambientales que pueden encontrarse en el territorio argentino.

Cuadro XIV.1: Cultivares de soja ensayados en Argentina.







## **Método experimental a campo y en cámaras climáticas**

El conocimiento existente de las combinaciones de elementos que determinan el crecimiento y desarrollo de los cultivos, en Fitotecnia, cuando se quieren lograr varias generaciones de un solo año, se utilizan cámaras climáticas, pero siempre deben completarse los estudios con generaciones totalmente obtenidas en siembras al aire libre, para comprobar si los nuevos cultivares obtenidos satisfacen sus necesidades en la combinación natural de elementos bioclimáticos regionalmente disponibles.

Otras veces, por este sistema se descubren situaciones bioclimáticas límites que de otra forma no podrían ponerse en evidencia. En Tucumán la caña de azúcar florece ocasionalmente, no permitiendo un plan normal de cruzamientos para el mejoramiento del cultivo por vía sexual. Antoni (1965), comprobó en cámara climática que la duración debía entre 11 horas 50 minutos y 12 horas 30 minutos, con temperaturas nocturnas no inferiores a 19°C y diurnas superiores a 25°C, lograba la diferenciación floral, con un mínimo de 45 ciclos inductivos. En Tucumán la falta de floración se debe a los descensos térmicos por debajo de 19° C en más de cuatro noches durante el lapso fotoperiódico inductivo natural, desde el 20 de febrero hasta el 20 de marzo. Con estos conocimientos fue posible inducir la iniciación de floración en caña de azúcar: a) con fotoperíodo natural y control de temperatura; b) con temperaturas ambientales favorables y fotoperíodos controlados; c) con temperaturas y fotoperíodos controlados. El uso de cámaras climáticas, (con parte del ciclo vegetativo de la caña de azúcar en el ambiente natural), ha permitido a la Estación Experimental Agrícola de Tucumán, lograr los cruzamientos necesarios para su plan de mejoramiento. Resultados similares se lograron en Louisiana (EEUU) en condiciones climáticas también límites para la obtención de floración en caña de azúcar (Paliatseas, 1962).

## **Método Estadístico**

Cuando se conoce el proceso fenológico de los cultivos a través de una serie de años y los correspondientes valores de los elementos meteorológicos de un lugar, pueden correlacionarse esas dos variables y poner de manifiesto las causas bioclimáticas determinantes de la aparición de las fases, es decir, la incidencia favorable o no del ambiente en la satisfacción de las necesidades de cada una de las etapas del cultivo. Aplicado el sistema a los datos de rendimientos, pueden explicarse éstos en función de valores meteorológicos y, si la correlación es estrecha, sirven de base para el pronóstico de cosechas.

Se hace referencia a un método propiciado por Baldatoni (1967) que considera los valores meteorológicos cada 10 días, suponiendo que es la unidad con la cual deben hacerse las correlaciones (Fig.XIV.3)

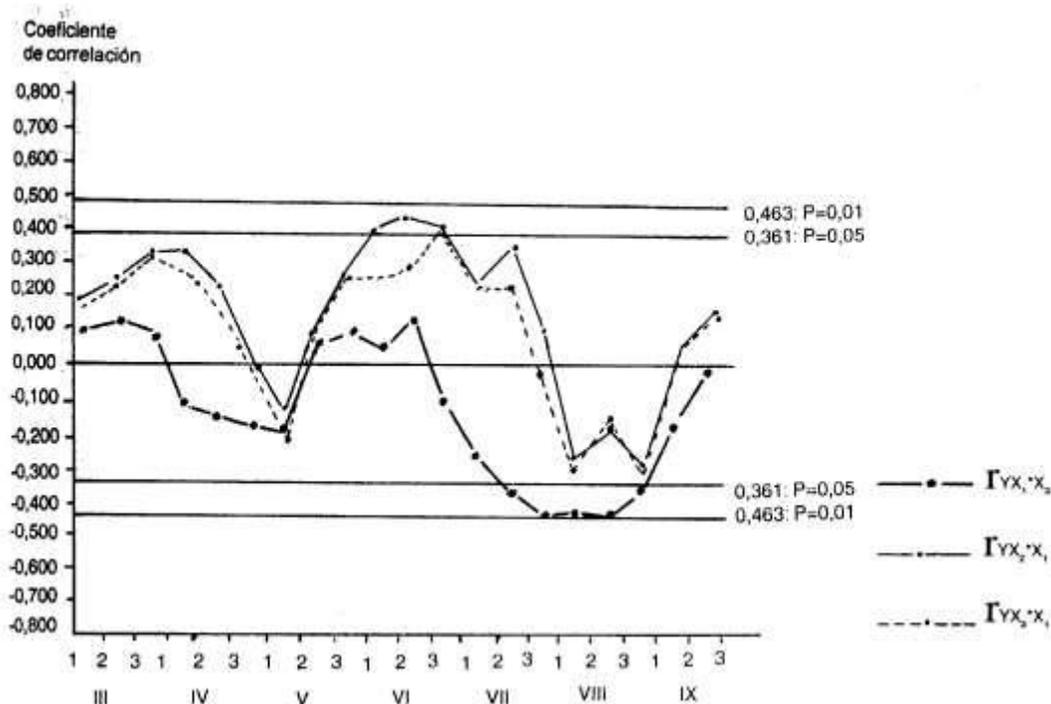


Figura XIV.3: Coeficientes de correlación parcial entre producción de maíz y temperatura del aire (X1), precipitación (X2), agua disponible (X3) en Perugia, Italia (Baltadini, 1967)

Los valores decádicos de todo el ciclo vegetativo, correlacionados con expresiones del cultivo, sean fases o el rendimiento, determina una serie continua de valores de correlación estadística, que según su significación marcan la importancia de los diferentes elementos en el proceso biológico. Las combinaciones de dos décadas y tres décadas de correlaciones simples, parciales y múltiples, conducen a la determinación de las exigencias bioclimáticas de los cultivos (Nicastro, 1967 a y b). Con este sistema de trabajo y el agregado de la correlación múltiple conjunta se pudo determinar la verdadera influencia de los elementos climáticos sobre el cultivo de trigo para la región climática argentina del Chaco.

### Método de trabajo de la Agroclimatología

Los procedimientos que usa la Agroclimatología surgen de la misma índole de sus objetivos principales, a saber.

Para dar adecuada respuesta a esos objetivos, la Agroclimatología se debe basar en el conocimiento y expresión climática de todos los Índices Biometeorológicos y Tecnometeorológicos conocidos, y en la información meteoro-climática completa y detallada, con el propósito de compilar un Inventario Agroclimático general.

#### a. Inventario agroclimático

La información necesaria para cualquier estudio o investigación agroclimática, proviene de diferentes fuentes:

##### 1- Información de las estadísticas climáticas corrientes

La información de las estadísticas climáticas corrientes suministra datos medios mensuales de elementos continuos y valores acumulados o frecuencias de los

discontinuos. Hasta el momento, son el recurso básico, ubicuo y asequible para obtener datos aplicables a problemas agrícolas, aunque resultan insuficientes por ignorar valores importantes como radiación solar, temperatura y humedad de suelo, etc., y no informar sobre la variabilidad temporal de los elementos.

## 2- Valores agroclimáticos derivados

### a. De las estadísticas climatológicas

Una gran cantidad de índices de gran utilidad agroclimática pueden obtenerse aplicando fórmulas o cálculos sencillos a la información climática corriente. Tal el caso de las sumas térmicas o grados-día medios mensuales, fechas medias de comienzo y fin de bioperíodos, balance de agua climático, duración de estaciones térmicas, etc.

### b. De series de valores meteorológicos medios mensuales y anuales

Las series plurianuales suficientemente extensas, son el tipo de información necesaria para computar los estadísticos de variación temporal de todos los elementos incluidos en las estadísticas climáticas. La desviación típica es la recomendada para los elementos de carácter continuo y la frecuencia, deciles o cuartiles para los discontinuos, con excepción de aquellos que obedecen a distribuciones especiales, como la gamma en el caso de las precipitaciones.

Con estos datos puede computarse índices de gran valor como son: variabilidad de las temperaturas mínimas y máximas absolutas mensuales y anuales, realizar el cálculo del balance de agua meteorológico o seriado, aplicar métodos de estimación de "horas de frío" y "unidades calóricas", etc.

### c. De valores meteorológicos diarios y horarios

Cuando se computan de series plurianuales, pueden proveer índices agroclimáticos útiles, como: fechas medias y de variabilidad de niveles térmicos críticos, mínimos y máximos, frecuencia de días con valores por debajo o por encima de determinados niveles térmicos, higrométricos, lumínicos, etc. Índices de mucho valor analítico en problemas especiales, por ejemplo: acumulación mensual de "horas de frío" o "unidades de enfriamiento", cantidad de horas con humedad relativa o rocío (período de hoja mojada) favorables para el desarrollo de enfermedades criptogámicas, número de horas de estrés calórico, etc., todos los cuales exigen la disposición de información meteorológica horaria, directamente observada o extractada de fajas de aparatos registradores.

Tanto los datos diarios como los horarios son de muy restringida accesibilidad, por lo que la necesidad de su conocimiento conduce al desarrollo de métodos estimativos de suficiente exactitud para fines agroclimáticos.

## 3- Índices agroclimáticos estimados

Los índices agroclimáticos estimados se obtienen por aproximación de los valores reales mediante la utilización de procedimientos y/o fórmulas de estimación, permiten obtener información para lugares carentes de observación meteorológica, o disponerla para calcular ciertos índices, cuando la misma no es asequible en la forma exigida.

El valor principal de todas las metodologías de aproximación, es que puedan desarrollarse a partir de información climática corriente muy fácil de conseguir. En general, estos métodos estimativos ofrecen suficiente exactitud y pueden usarse con confianza cuando han sido desarrollados sobre la base de valores seriales realmente observados.

**b. Evaluación agroclimática**

La presentación de información adecuada para establecer comparaciones posibles de aplicar a cualquier tipo de análisis agroclimático regional, debe contener valores climáticos simples y expresiones agroclimáticas derivadas.

Cuando lo que se busca, es determinar la aptitud agroclimática local o regional para un cultivo en particular, será necesario atender a la consideración de los aspectos referentes a sus exigencias biometeorológicas de mayor importancia, y procesar la información considerando aquellos periodos temporales en los que el cultivo cumple sus procesos de crecimiento y desarrollo.

Los estudios agroclimáticos especiales suelen abandonar el tiempo mensual, propio de la climatología clásica, para considerar ciertos sucesos indicativos, tales como los tiempos agrícolas, los procesos fenológicos, las épocas culturales de cada cultivo, la variación temporal de sus exigencias, etc.

Para aquellos cultivos para los cuales se han desarrollado modelos biometeorológicos que permiten la delimitación temporal de las distintas fases fenológicas, el estudio agroclimático especial podrá ajustarse con mayor precisión a esta división del ciclo cultural.

**c. Cartografía agroclimática**

La forma más usada de informar los resultados de estudios agroclimáticos es a través de la cartografía, consistente en la representación geográfica de la intensidad, frecuencia, variabilidad, temporalidad y cualquier otra característica que presente un elemento, referencia o índice agroclimático en el sentido espacial. La representación de estos evaluadores de la aptitud agropecuaria, sobre mapas convenientemente dimensionados, permite visualizar la ubicación de áreas óptimas, adecuadas, marginales y/o ineptas, referentes a la influencia del elemento representado en todas aquellas acciones o proyectos destinados a planificar tareas, disponer equipos e implementos, seleccionar variedades y cultivares, anticipar dotaciones de riego, etc.

Las formas que puede presentar la cartografía agroclimática son numerosas, atendiendo no solamente al gran número de indicadores existentes o posibles de desarrollar, sino también al propósito o interés de su aplicación especial. Además, cada tipo de cartografía utiliza periodos particulares de representación.

Con el fin de asimilarla a la información climatológica, el mes es el periodo más utilizado para la cartografía de carácter general, pero cada carta se adecua al tiempo que interesa para su finalidad específica.

En cada caso, las dimensiones de las cartas, el tipo de proyección y la escala cartográfica a utilizar dependen del objetivo final.

Según el tipo de representación gráfica se pueden considerar dos clases de cartas.

**1. Cartas Agroclimáticas de isolíneas**

Una isolínea es una línea que, sobre una carta geográfica, une los puntos donde el elemento cartográfico registra igual valor.

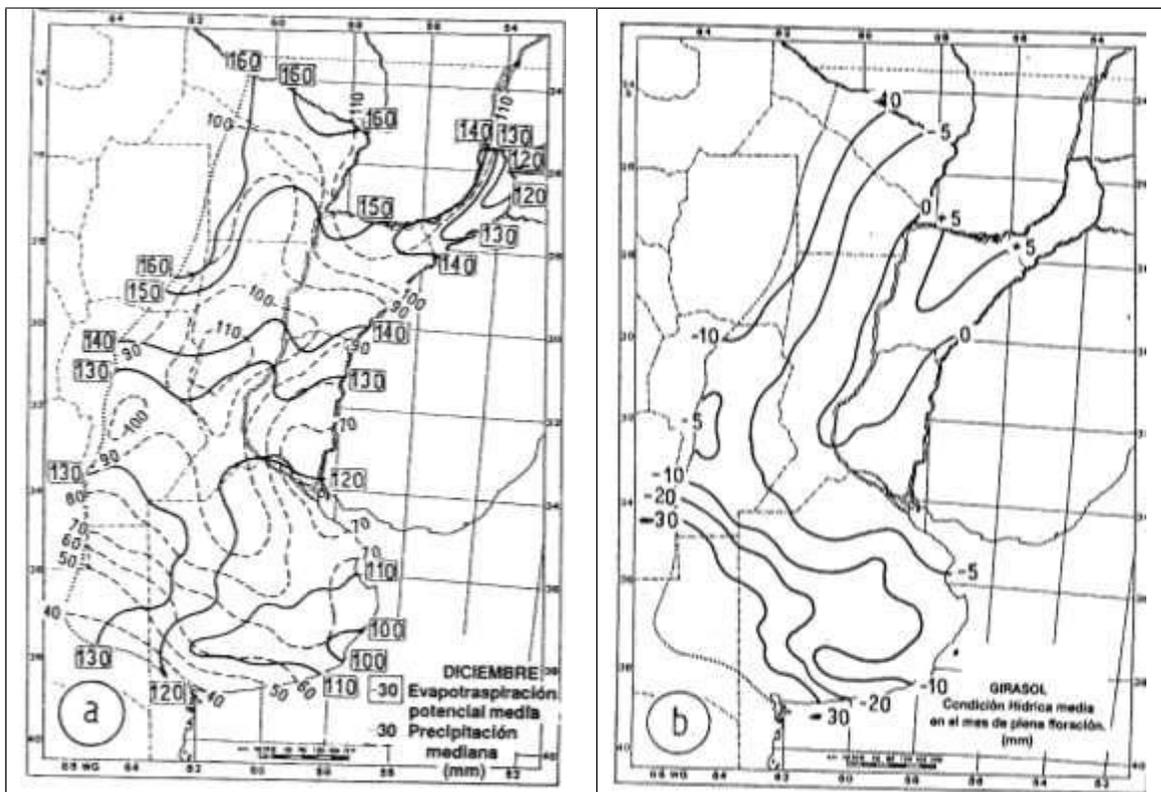
La utilización de isolíneas se reserva preferentemente para la confección de cartas referentes a un solo valor agroclimático. Raramente se usan para dos o más, en cuyo caso se usan trazados diferenciales.

Para el trazado de isolíneas se deben seguir las normas conocidas: a) no deben cruzarse; b) su trazado debe respetar los accidentes topográficos y geográficos, para lo cual el mapa básico de trabajo los debe indicar especialmente; c) las cartas no deben ser “cargadas” de isolíneas, debiéndose elegir una escala de separación que asegure una

adecuada densidad de líneas que, sin perder valor de información, respete el grado de sensibilidad del elemento representado.

El uso de sistemas informáticos para la confección de cartas agroclimáticas facilita enormemente su realización aunque, en ocasiones, la reducida densidad de observatorios puede llevar a resultados no totalmente aceptables. Esto es importante sobre todo si el área presenta orografía o accidentes geográficos capaces de producir importantes efectos en el elemento cartografiado. De ser posible, cuando en las cartas se representan fechas de ocurrencia de cualquier suceso, las isolíneas se trazan para los días 1<sup>o</sup>, 11 y 21 del mes.

Hay innumerables tipos de graficación por isolíneas, sea de elementos climáticos simples, térmicos o hídricos, y de índices agroclimáticos derivados, como en unidades calóricas, horas y unidades de frío, valores del régimen de heladas, condición hídrica, etc. (Figura XIV.1)



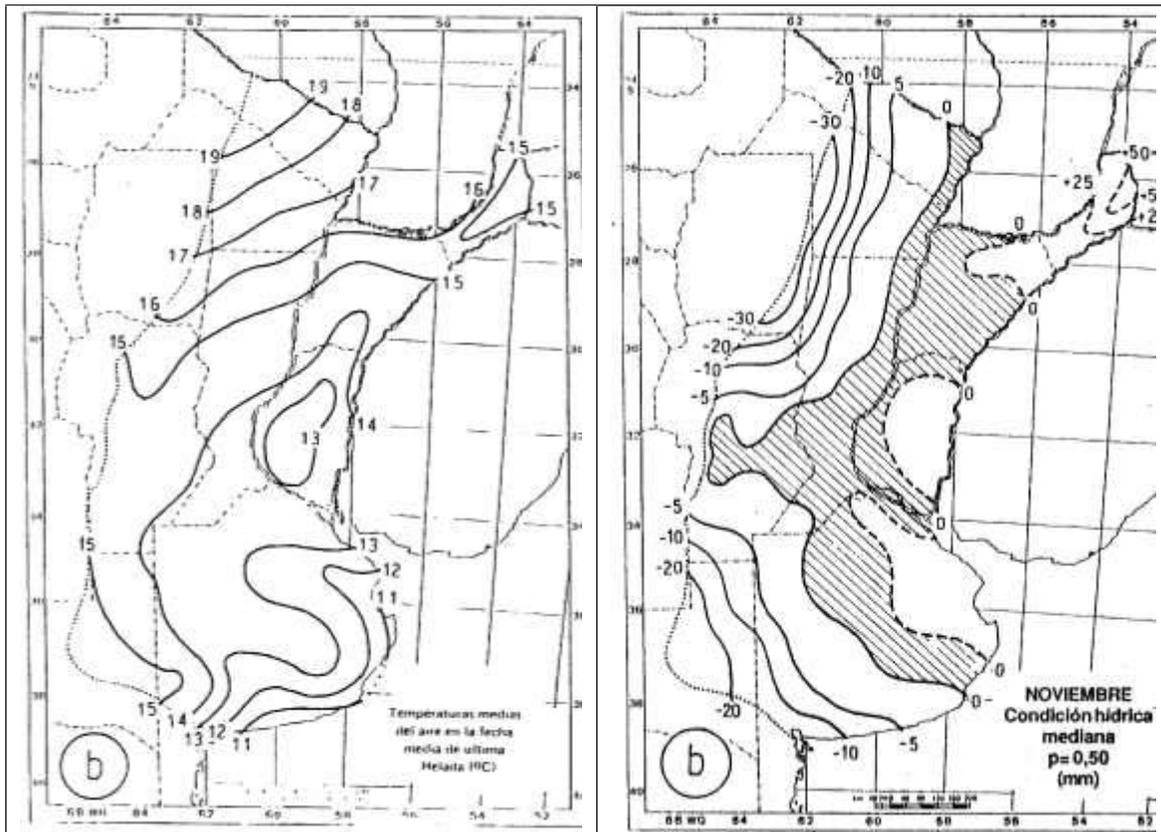


Figura XIV.1: Evapotranspiración potencial media y precipitación mediana, ambas en mm  
 b) Girasol. Condición hídrica media en mm en el mes de plena floración c) Temperaturas medias del aire en la fecha media de última helada d) Condición hídrica mediana en mm ( $p=0,50$ )

## 2. Cartas agroclimáticas zonificadas

La partición de un área, región o territorio en zonas de características agroclimáticas similares, es una forma de cartografía muy utilizada. Se representa así la acción, conjunta o combinada, de dos o más índices integrados, a veces en alguna fórmula y jerarquizados por denominaciones especiales. La identificación de las diferentes zonas puede hacerse numéricamente, por letras, por rayados, por coloración, etc. En ciertos casos se trazan cartas de isóneas y zonificación en forma conjunta. Sus formas de presentación son muy variadas, atendiendo a las características del problema cartografiado y la magnitud geográfica cubierta.

Entre las aplicaciones más destacadas pueden citarse las cartas de aptitud agroclimática para un fin agrícola determinado y las zonificaciones resultantes por aplicación de una clasificación agroclimática.

En las primeras se determinan las áreas favorables o desfavorables a un cultivo o aptitud agrícola en función de los valores de los índices agroclimáticos conocidos.

En los segundos, como su nombre lo indica, consisten en aplicar geográficamente los índices y agrupamientos incluidos en una clasificación agroclimática. Por ello, utilizan la zonificación diferencial para aplicar en forma conjunta los varios rubros de una clasificación.

El conjunto de cartas referentes a un aspecto específico, constituyen un Atlas Agroclimático, el cual puede abarcar las características agroclimáticas generales de un país, agrupar la cartografía relacionada con un cultivo en particular, describir agroclimáticamente a regiones determinadas, ubicar áreas con condiciones agroclimáticas favorables para un emprendimiento agrícola dado, etc.

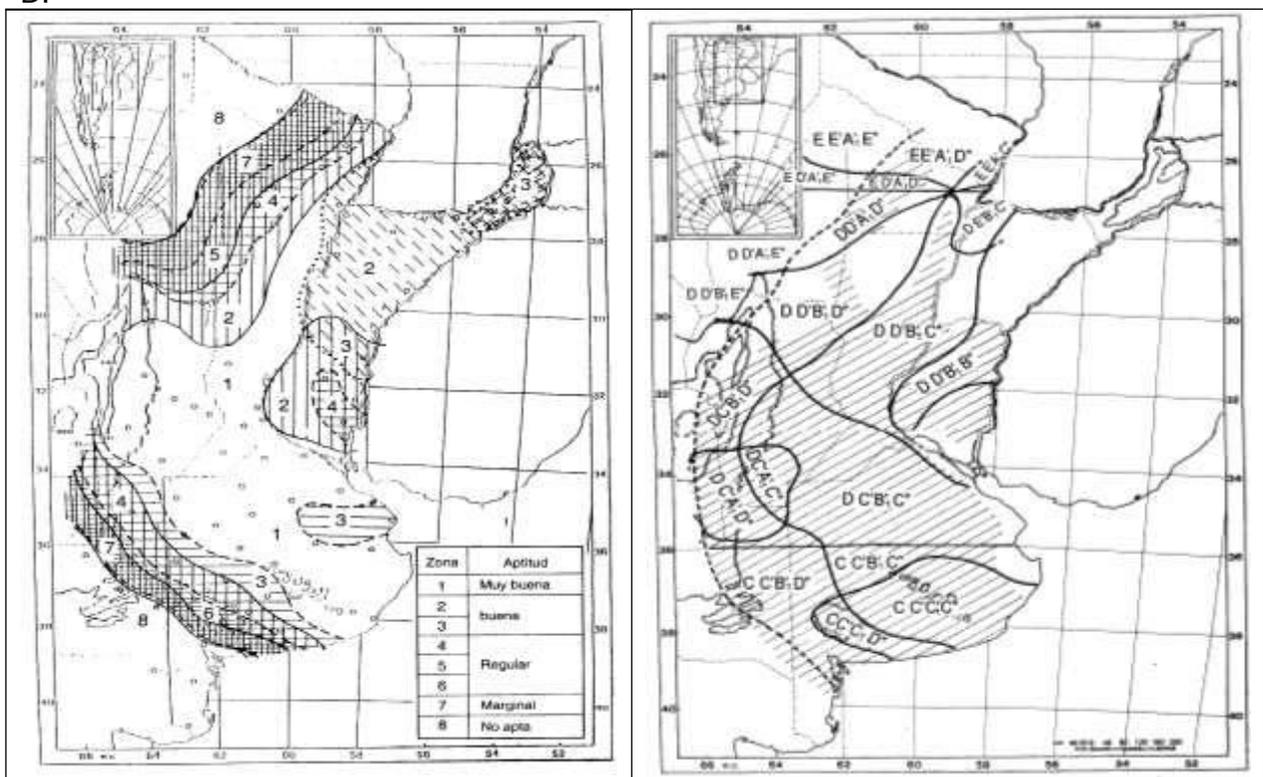
En la Argentina, el Departamento de Meteorología Agrícola editó, entre los años 1953 y 1958, el Atlas Agroclimático Argentino, compuesto por 23 cartas, entre fenológicas, de operaciones culturales, de índices térmicos e hidrológicos y de valores bioclimáticos de cultivos.

Un estudio sobre la Agroclimatología del cultivo de trigo en la Argentina, fue ilustrado con 66 cartas agroclimáticas, constituyendo un Atlas completo sobre los aspectos fenológicos, bioclimáticos y agroclimáticas de este cereal en la amplia región de cultivo en el país (Pascale y Damario, 1961).

Otra compilación importante es la que ilustra la publicación sobre "Cartas agroclimáticas de las regiones pampeana, chaqueña y litoral de cultivo en secano" (Revista Proceder Agrotecnológico N° 1-6), en la que a través de 125 cartas originales, bimestralmente se analizaron las condiciones de crecimiento y desarrollo de los cultivos extensivos, según sus exigencias bioclimáticas y las disponibilidades agroclimáticas regionales (Damario y Pascale, 1992-93).

Recientemente, debe señalarse la contribución efectuada en la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas de la UBA, que publicó el Atlas Agroclimático de la Argentina (Murphy *et al*, 2008) con 130 cartas, realizadas con la información climatológica publicada en el período 1971-2000.

Distintos ejemplos con cartas de zonificación se presentan en la figura XIV.2. A, B, C y D.



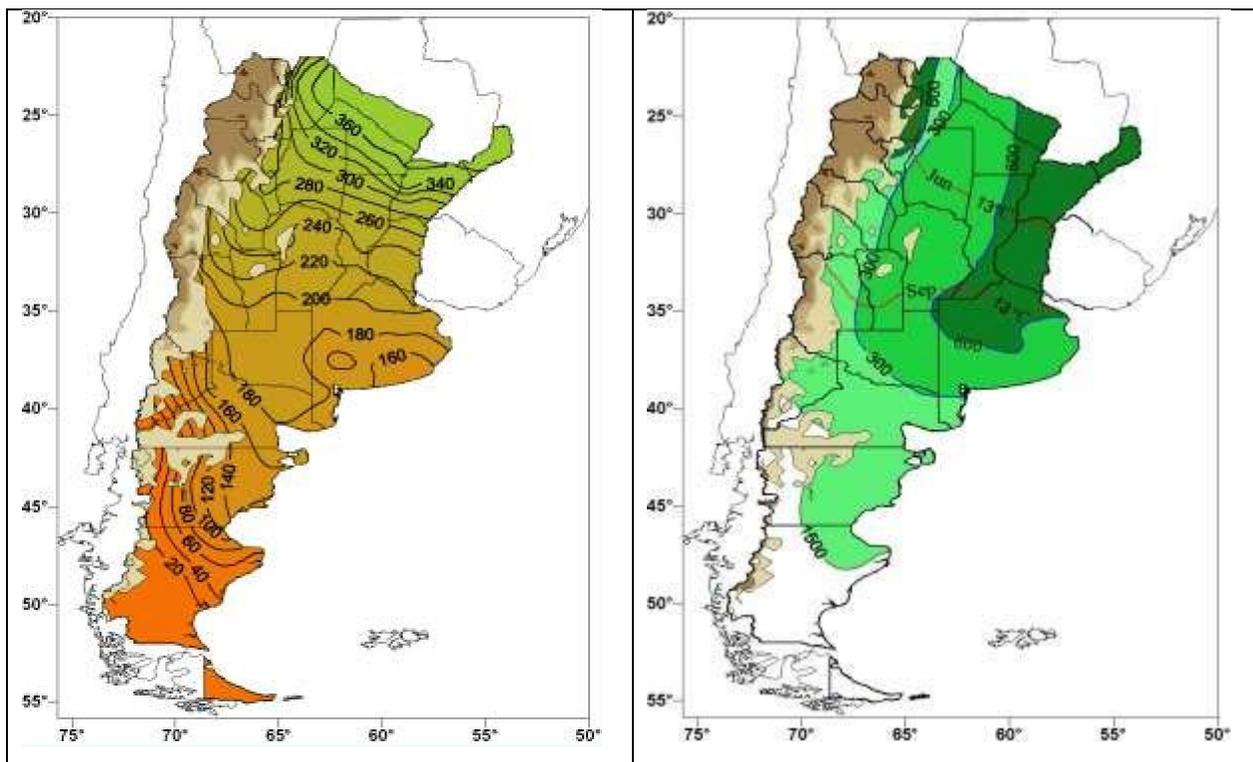


Figura XIV.2.a: Aptitud mesoagroclimática de la subregión oriental para el cultivo de la soja. 2.B: Clasificación agroclimática del cultivo de trigo. 2. C: Duración media del bioperíodo de 15°C. 2. D: Aptitud agroclimática para el Cártamo. Isolíneas usadas: 1500°/día que permiten maduración granos. Lluvia durante el ciclo (300 o 600 mm). Temperatura media junio y setiembre que determinan el ciclo el ciclo del cultivo.

## 14. ACCIÓN DE LOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS SOBRE LOS CULTIVOS

Antonio J. Pascale y Edmundo A. Damario

### Introducción

Los elementos de carácter físico de la biosfera, comprendiendo las meteorológicas, astronómicas y edáficas, que actúan sobre los procesos de crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos, reciben la denominación general de *elementos biometeorológicos*.

Según los efectos favorables o adversos que pueden provocar los elementos biometeorológicos, han sido clasificados (Burgos, 1952) en:

- a. Auxégenos: aquellos que favorecen o regulan el crecimiento
- b. Anaptígenos: los que satisfacen las exigencias para el desarrollo
- c. Tanatoclimáticos: los que producen daños parciales o totales en la vegetación por su inacción o por la superación de los límites críticos de tolerancia.

Los distintos elementos biometeorológicos pueden actuar aisladamente sobre el crecimiento y/o desarrollo, pero los cultivos reaccionan a la totalidad del complejo ambiental más que a un solo componente del mismo.

Además, los elementos actúan interaccionándose entre sí, produciendo a veces compensaciones y en otras anulándose mutuamente. En cada subperíodo vegetal existe una combinación óptima de elementos bioclimáticos para un crecimiento o desarrollo con vigor máximo. Cuando un determinado factor se aproxima al límite extremo de tolerancia de la planta, enmascarando las otras influencias, ese factor controla el sistema. Por lo tanto, la separación en elementos bioclimáticos para el crecimiento y para el desarrollo es un tanto artificial, sirviendo únicamente para interpretar la influencia biológica relativa ejercida por cada integrante del ambiente en esos dos procesos vitales. En realidad, los cultivos están simultáneamente creciendo y preparándose para superar las distintas etapas del proceso fásico.

### 1 Radiación solar

La radiación solar es el elemento fundamental de todos los procesos físicos y biológicos que ocurren en la biosfera.

La luz solar recibida por la vegetación es utilizada de muy diversas maneras, que hacen tanto a su intensidad, como a su calidad, dirección de incidencia, duración, etc.

Para poder estudiar los diversos efectos biológicos que provoca o estimula, es conveniente considerarlos separadamente como:

1. Efectos *fotoenergéticos*: producidos por la cantidad o intensidad de energía provista para el proceso de formación de materia orgánica por fotosíntesis y, en consecuencia, actuando como elemento auxégeno.

2. Efectos *fotoestimulantes*: sobre procesos de movimientos como los de orientación o los tropismos, vinculados a la calidad lumínica, procesos formativos como el alargamiento de tallos, expansión foliar, formación de pigmentos y la floración en plantas sensibles, relacionados a la duración relativa de periodos luminosos y oscuros, a través del fenómeno conocido como "*fotoperiodismo*", en este último caso como elemento anaptígeno.

#### a. Efectos fotoenergéticos

El aprovechamiento por parte de los vegetales de la energía calorífica de la radiación solar en el proceso de la fotosíntesis, consiste en la transformación del  $\text{CO}_2$  del aire en materia orgánica con la intervención de la clorofila.

Sólo una reducida cantidad de la energía radiante disponible en la biosfera es aprovechada por las plantas en la fotosíntesis, que en términos medios es de 1 a 2 %, y puede alcanzar al 4 o 5 % en cultivos muy eficientes o en condiciones de alta provisión de  $\text{CO}_2$ .

La ineficiencia vegetal en el aprovechamiento energético depende de varias causas:

a. No toda la radiación incidente es absorbida por las hojas, ya que una parte es reflejada (20%), otra parte es transmitida (5 a 10%), un 20% se usa para mantener la temperatura foliar, otro 50% se gasta en la transpiración y sólo el remanente se utiliza en la fotosíntesis,

b. La clorofila sólo muestra una absorción en la banda de los rojos (0,65 -0,68 u) y otra, menos intensa, en la banda azul-violeta (0,46 u).

c. La intensidad de la fotosíntesis se incrementa con la intensidad de la luz hasta un cierto punto, llamado punto de saturación lumínica, a partir del cual comienza a disminuir. El nivel de saturación luminosa es variable: en plantas heliófilas la saturación lumínica es elevada (25.000 lux para maíz - 60.000 lux para caña de azúcar), pero este nivel puede considerarse bajo si se lo compara con la disposición natural en los ambientes de cultivo donde, en latitudes medias, se puede alcanzar al medio día hasta 120.000 lux en verano y 60.000 en invierno.

Los niveles de aprovechamiento en un cultivo dependen de la edad o etapa de su ciclo, del índice de área foliar (IAF), de la densidad de siembra, de la disposición foliar, de la concentración de  $\text{CO}_2$ , de la temperatura, del contenido de agua edáfica, etc.

Con relación a la temperatura, la asimilación clorofiliana del  $\text{CO}_2$  aumenta con el incremento de la temperatura desde un mínimo entre 0° y 5° hasta un cierto valor óptimo, variable para cada cultivo, después del cual cualquier aumento térmico ocasiona disminución en el proceso fotosintético, cuyo cese se opera a los 35°-40°C. El óptimo para papa es de 30°C, para tomate y maíz 35°C (Ventzkevich, 1961).

Mientras que la fotosíntesis es un proceso de formación de materia orgánica y ocurre de día por la disposición de luz, la respiración es un mecanismo de gasto de materia orgánica y es continuo, día y noche. Para la respiración la temperatura mínima es algo inferior a 0°C, el punto de máxima intensidad entre 35° y 40°C y, el cese, ocurre a partir de los 50°C. La materia orgánica acumulada diariamente, o fotosíntesis neta, es la diferencia entre lo producido (fotosíntesis) y lo consumido (respiración). (Fig. XV.1)

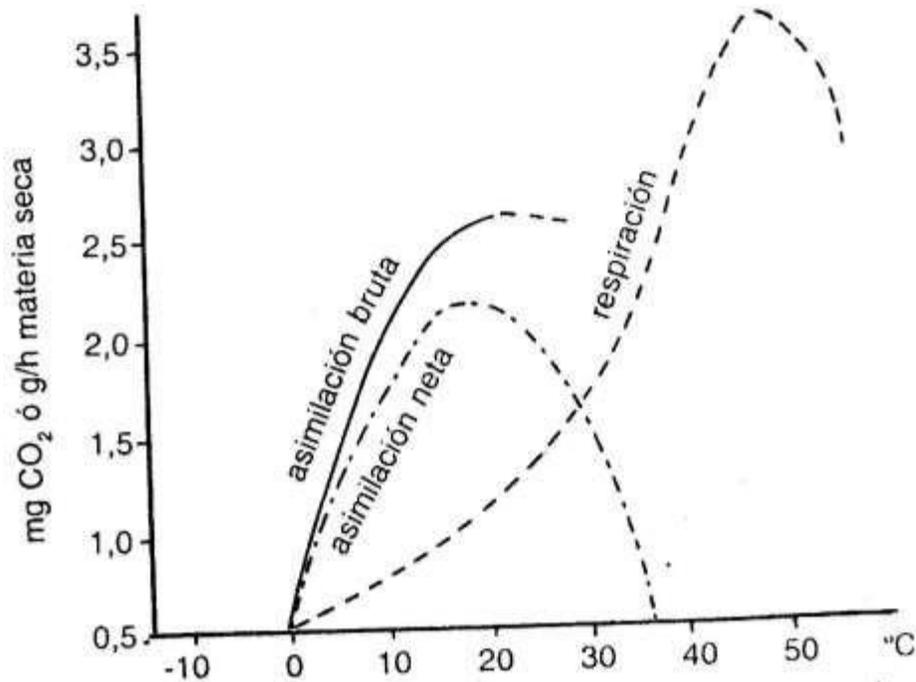


Figura XV. 1: Relación entre Fotosíntesis y respiración.

Con suficiente intensidad luminosa, la formación de materia orgánica por fotosíntesis es aproximadamente diez veces mayor que el gasto por respiración. A medida que la intensidad disminuye, sucede lo mismo con la fotosíntesis y se alcanza así un punto en que no hay formación de materia.

La radiación como efecto energético es un tema ampliamente desarrollado en Fisiología Vegetal donde se contempla la clasificación de las plantas de acuerdo con modelos fotosintéticos, según las respuestas de la fotosíntesis y la respiración a la temperatura (FAO, 1978). Las principales características agrupa a los cultivos en dos modelos fotosintéticos, las plantas C<sub>3</sub> y las plantas C<sub>4</sub>:

**Plantas C<sub>3</sub>:** Reducen el CO<sub>2</sub> mediante el difosfato de ribulosa como aceptor primaria y el ácido fosfo-glicérico como primer producto estable. Tienen escoto (durante el lapso nocturno continúa con la respiración) y fotorespiración, por lo cual son menos eficientes en la formación de materia seca por gramo de agua utilizada. Es decir, se adaptan mejor en lugares o épocas de siembra con bajas temperaturas y buena disponibilidad de agua. Se distinguen dos grupos de plantas:

- I. Rango operativo entre 5 y 30°C y temperatura óptima de la fotosíntesis entre 15 y 20°C. Se saturan lumínicamente entre 0,2-0,6 ly/min. La eficiencia reducida en el uso del agua la señala la producción 1,25 a 2,50 mg de materia seca por gramo de agua utilizada. Ejemplos: cereales invernales, lino, colza, papa, lenteja, remolacha, etc.
- II. Rango operativo entre 10-35°C y temperatura óptima de la fotosíntesis entre 25 y 30°C. La saturación lumínica se produce entre 0,3 y 0,8 ly/min. La eficiencia en el uso del agua es algo superior a las plantas del grupo, produciendo entre 1,4 y 3,3 mg de materia seca por gramo de agua. Ejemplos: soja, arroz, algodón, batata, olivo, naranjo, cacao, etc.

*Plantas C<sub>4</sub>*: Reducen el CO<sub>2</sub> mediante el ácido fosfo-enol-pirúvico como aceptor primario con aspartato y malato como primeros productos estables. Tienen preponderantemente escotorespiración, siendo por lo tanto más eficiente en el aprovechamiento del agua en la formación de materia seca. Se adaptan a un rango mayor de temperaturas que las plantas C<sub>3</sub> y prosperan en lugares con altas temperaturas y buena radiación.

Pueden clasificarse en grupo III, IV y V, debido a sus características particulares de reacción fototérmicas.

III. Rango operativo entre 15 y 45°C y saturación lumínica elevada (1,0-1,4 ly/min). Alta eficiencia en el aprovechamiento del agua pues producen entre 3,3 y 6,7 mg de materia seca por gramo de agua.

IV. Características similares al grupo anterior, aunque el valor térmico en el umbral superior es algo menor, tanto en la temperatura de la fotosíntesis como en el rango operativo. Pocos cultivos gozan del aprovechamiento climático de las plantas C<sub>4</sub> de los grupos III y IV, debiendo mencionarse el maíz, el sorgo, la caña de azúcar y el mijo.

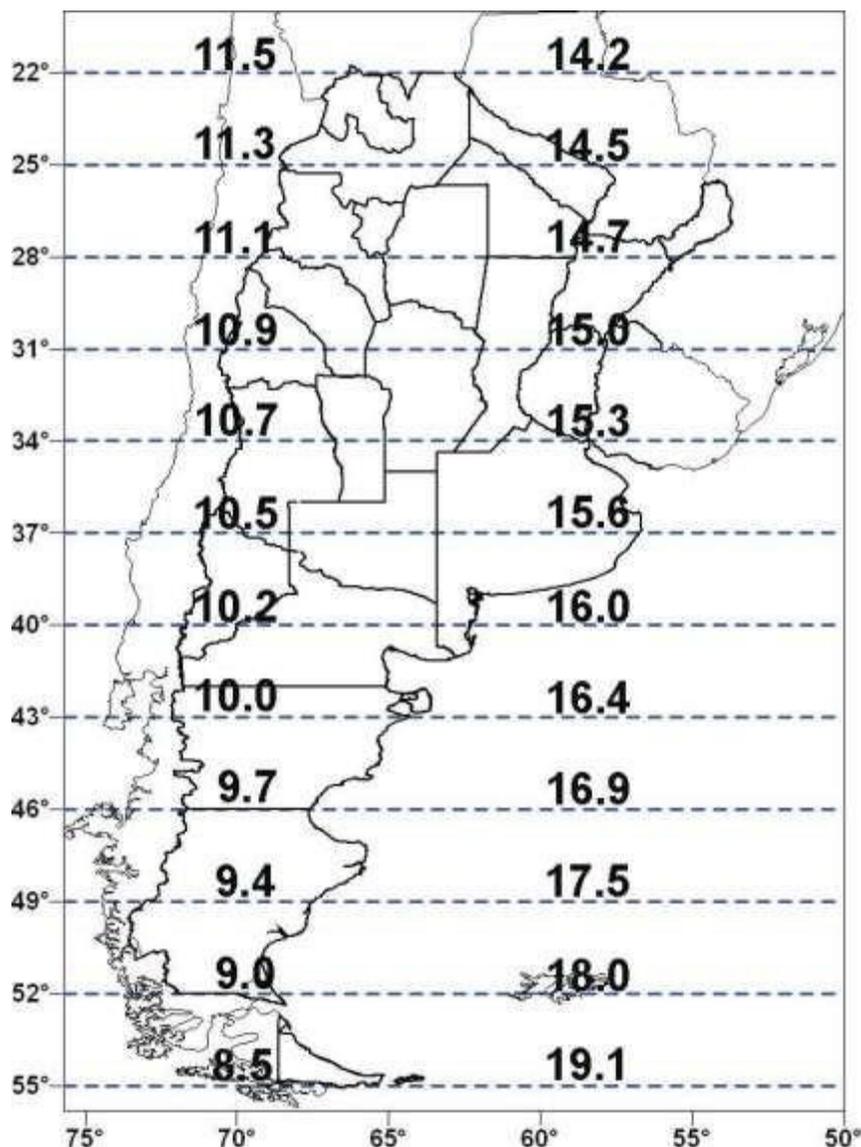
V. Formado por el agave y el ananá, que poseen ácido crasuláceo en su metabolismo, y pueden prosperar en ambientes aún más cálidos que las plantas de los grupos III y IV, con gran aprovechamiento del agua, dado que producen entre 5 y 20 mg de materia seca por gramo de agua utilizada.

Los modelos fotosintéticos brevemente desarrollados, completan el tema de las *Modalidades Bioclimáticas de los cultivos*. Por otra parte, la intensidad de los procesos radiativos es un integrante principal, junto a otros elementos meteorológicos, de modelos fisiológicos desarrollados para la estimación del ciclo y el rendimiento posible de un cultivo en un sitio determinado.

Aun cuando la acumulación de la energía radiativa diaria durante el proceso fenológico demostró ser más eficiente que la acumulación térmica para explicar las causas de las variaciones anuales de la floración y crecimiento, en los estudios bioclimáticos no es común encontrar índices que utilicen la radiación para expresar acciones sobre el crecimiento vegetal debido a la escasez de mediciones de esta variable.

## **b. Efectos fotoestimulantes**

La acción fotoestimulante más importante se debe al efecto que ejerce sobre el desarrollo vegetal la duración del período diario de iluminación, que transcurre entre la hora de salida y la puesta del sol, conocida como “duración del día”. Como el efecto biológico estimulante comienza con intensidades lumínicas bajas, de menos de 10 lux, también se incluye el efecto fotoestimulante a la luz de ambos crepúsculos civiles, cuando el sol se encuentra 6° por debajo del horizonte. A esta duración del período luminoso con efecto biológico, que se extiende entre la hora de comienzo del crepúsculo matutino hasta la hora de finalización del crepúsculo vespertino, se la conoce en biometeorología como “*fotoperíodo*”, con variaciones según latitud y época del año como se indica en la carta para la Argentina (Fig. XV.2).



**Figura XV.2:** Variación latitudinal del fotoperíodo para el solsticio de invierno y verano respectivamente, en horas y décimas.

La reacción de las plantas al fotoperíodo comenzó a estudiarse a partir de Garner y Allard (1920), quienes observaron que algunas variedades de tabaco y maíz cultivadas en Washington persistían con un crecimiento vegetativo vigoroso durante todo el verano y no florecían, mientras que cultivadas en invernadero durante el invierno florecían abundantemente, aunque con menor vigor vegetativo. De allí dedujeron que la diferente duración del período de luz diario era la causa determinante del diferente comportamiento. Experimentando con diversas especies vegetales sometidas a variaciones en la duración del día, llegaron a clasificarlas como plantas de "*día largo*", o "*día corto*", según que aceleraran su desarrollo con el alargamiento o acortamiento del período luminoso diario, o "*indiferentes*" si la floración se producía con cualquier fotoperíodo. Es importante señalar aquí el concepto de *umbral fotoperiódico* o *fotoperíodo crítico*. Algunas especies

vegetales, que pertenecen a cultivos agrícolas muy importantes, no florecen aunque hayan completado su necesidad energética debido a que necesitan un fotoperíodo de duración tal que la estimule para poder entrar en la etapa reproductiva. Esa duración fotoperiódica crítica puede alcanzarse inclusive en algún momento anterior a un crecimiento vigoroso y las plantas quedan satisfechas en esa exigencia bioclimática pudiendo florecer posteriormente sin alcanzar un crecimiento agronómico satisfactorio.

La acción de la duración de la luz conocida como “*fotoperiodismo*” influye determinando el avance del vegetal hacia su desarrollo, mediante el proceso fisiológico no visible del sistema fitocromo, sólo expresado fenológicamente con la aparición sucesiva de órganos. El fitocromo es una proteína que como pigmento tiene dos formas intercambiables, activa o inactiva a la luz, determinantes en una planta del pasaje de su estado vegetativo al reproductivo.

Si bien el desarrollo de un vegetal puede conocerse por métodos químicos o histológicos, en Bioclimatología Agrícola se lo comprueba con la observación de aquellas fases que denotan que la planta ha satisfecho las necesidades previas para entrar en la etapa reproductiva. Sin embargo, debe conocerse en cuales etapas del cultivo se ejerce la acción fotoestimulante del fotoperíodo, aspecto importante en la época de siembra de las especies anuales.

Es necesario señalar que la luz del fotoperíodo ejerce su acción sobre los tejidos verdes de las plantas en momentos diferentes del ciclo vegetal, cuando estimulan a la planta a desarrollarse. Esto se denomina *inducción fotoperiódica* y, en algunas plantas, se produce tempranamente poco después de su nacimiento, caso soja o, unos 30 días después del nacimiento, en trigo, o más tarde en el ciclo cuando, además, interactúa con otro factor (por ejemplo, con la temperatura en el caso de la caña de azúcar).

La *inducción fotoperiódica* temprana determina que la planta ya se encuentre *estimulada* para florecer antes de haber logrado el estado de *disposición* correspondiente. Por ello, cuando la planta ya está satisfecha, por ejemplo con su requerimiento térmico cumplido, puede florecer aún vegetando con fotoperíodos superiores (plantas de días cortos) o menores (plantas de días largos) a su fotoperíodo crítico. Es lo que sucede por ejemplo, con un cultivar de soja del grupo VII (se induce con fotoperíodos por debajo de 13 horas 30 minutos), cuando se lo siembra de manera que tenga tejidos activos a la luz en la rama ascendente del fotoperíodo anual, con valores menores al correspondiente a su umbral crítico. Se produce así la inducción fotoperiódica tempranamente y luego, cuando satisface su requerimiento térmico, las plantas florecen aún en pleno verano cuando todavía no han alcanzado un crecimiento abundante para producir una cosecha rentable. Para evitar este inconveniente, la práctica cultural adecuada en el cultivo de la soja, es realizar la siembra de esos cultivares después de la fecha correspondiente a su fotoperíodo crítico inductivo.

La cualidad de precoz o tardío de una especie está señalada por sus diferentes cultivares con características bioclimáticas diferenciales debido a sus cualidades de “disposición” y “estímulo” frente a los componentes climáticos del área de su dispersión. El estímulo fotoperiódico es primordial en muchos cultivos.

En términos generales los cultivos anuales invernales son de día largo y solamente florecen o espigan cuando superan su umbral fotoperiódico. Por tal motivo, los trigos primaverales como Marqués, de cultivo en latitudes altas del Hemisferio Norte, cuando se siembra en la Argentina se comporta como cultivar tardío, ya que tiene que permanecer sin espigar hasta alcanzar su fotoperíodo crítico inductivo. Por otra parte, los trigos argentinos, de necesidad fotoperiódica menor, ensayados en la Facultad de

Agronomía de Buenos Aires, sembrados en duraciones de día mayores a las requeridas para entrar en desarrollo, por ejemplo en marzo, se inducen precozmente y, con otoños relativamente calientes, logran espigar en pleno invierno, aunque con reducida “energía” y total infertilidad.

Los cultivos estivales anuales son de día corto e igualmente están influenciados por el fotoperíodo posterior a la siembra, determinante de la precocidad en el desarrollo, aspecto que se ejemplificó con la soja del grupo VII.

Los cultivares de soja se clasifican en grupos de maduración según su relación al fotoperíodo y, por tal motivo, sus áreas de siembra se distribuyen en franjas orientadas latitudinalmente. El fotoperíodo de 16 horas 30 minutos inhibe la floración de las plantas pero, por debajo de esa duración se van sucediendo los umbrales fotoperiódicos críticos desde el grupo más precoz hasta el más tardío. Los grupos más precoces son prácticamente indiferentes al fotoperíodo de los días de los veranos de la región de cultivo de la especie, mientras que los más tardíos sólo logran su desarrollo con los fotoperíodos cortos intertropicales. Como ejemplo se incluye la carta de la Fig. XV.3, que muestra la distribución latitudinal en la Argentina de los diferentes grupos de maduración del cultivo de la soja.

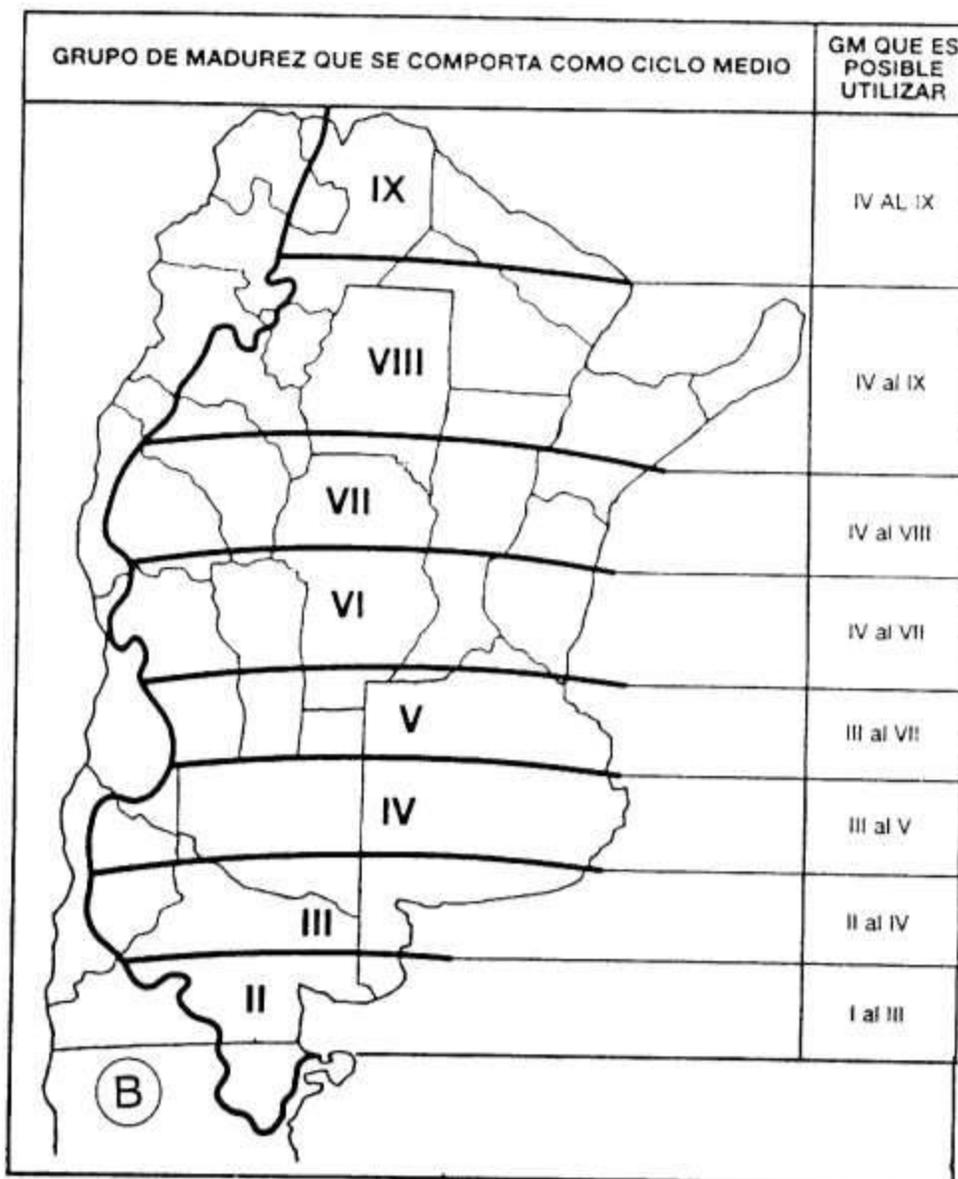


Figura XV.3: Franjas latitudinales de los GM de la soja en la Argentina, según INTA (1997)

El subperíodo nacimiento-floración depende fundamentalmente del fotoperíodo de la latitud geográfica de su implantación, dado que los distintos cultivares se inducen fotoperiódicamente con distintos umbrales, de acuerdo a su clasificación grupal. Así, en el norte de la región sojera argentina, se siembran los cultivares con las necesidades fotoperiódicas más reducidas para florecer (umbrales más bajos), en tanto que hacia el sur se ubican a los que presentan la mayor indiferencia al fotoperíodo (por tener umbrales más altos), dependiendo el cumplimiento del ciclo casi exclusivamente de la temperatura como disponibilidad energética.

Esta característica de la especie se refleja en cada lugar por el comportamiento de distintos cultivares según la fecha de siembra. En el ejemplo de la Figura XV.4, se

muestra como en Buenos Aires el atraso en la fecha de siembra de los cultivares de los grupos 0, III, VI y VIII determinan que la duración del subperíodo hasta la floración se mantenga o disminuya marcadamente desde la indiferencia fotoperiódica de los primeros grupos, hasta los del grupo VIII que, en este ejemplo, tienen la mayor reacción a los días cortos.

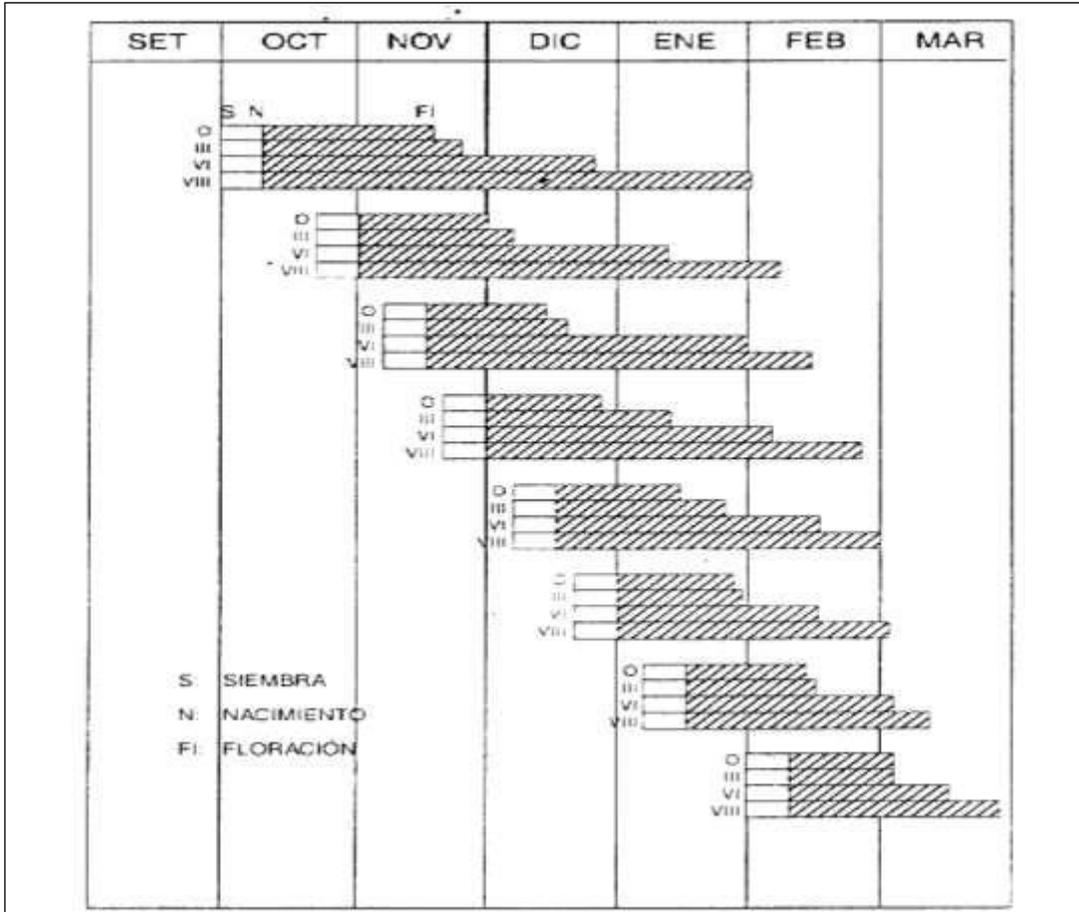


Figura XV.4: Datos fenológicos medio para el Subperíodo siembra – floración de distintos grupos de cultivares de soja en Buenos Aires. (FAV) Periodo 1958-1959 1969-1970.

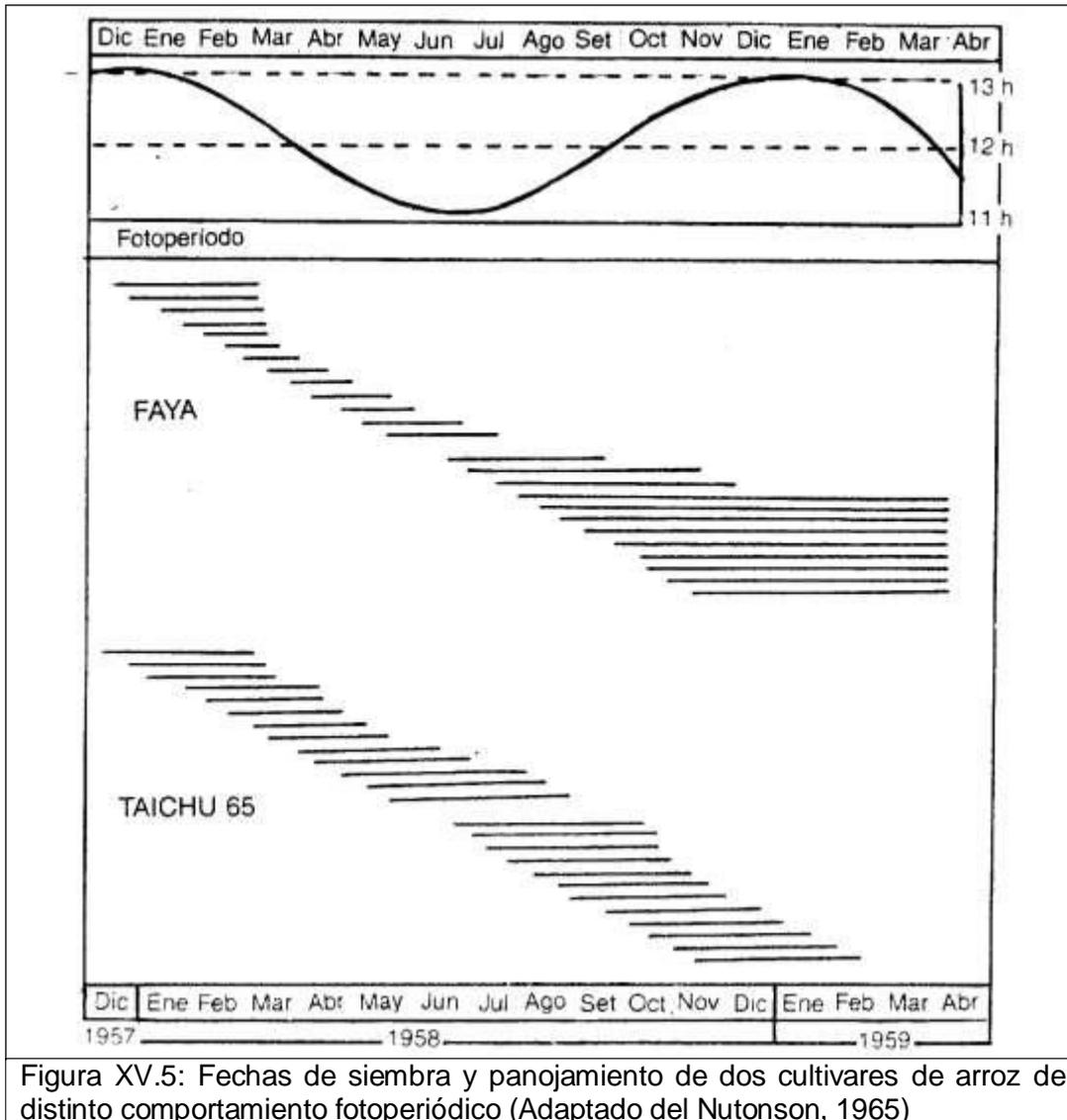


Figura XV.5: Fechas de siembra y panojamiento de dos cultivares de arroz de distinto comportamiento fotoperiódico (Adaptado del Nuttonson, 1965)

Igual explicación tiene la Figura XV.5 donde se muestra como la siembra de cultivares de arroz: Faya (muy fotoperiódica) y Taichu 65 (indiferente o poco fotoperiódica) reaccionan en las siembras continuadas en Kimnberley, Western Australia ubicada en 15° 67' de latitud S (Nuttonson, 1965).

El manejo adecuado de la inducción fotoperiódica y el conocimiento de las necesidades de umbrales críticos de las diferentes especies, permiten lograr primicias o cosechas tardías, comercialmente valiosas en especies hortícolas y florales, todo lo cual se logra con acortamientos o alargamientos de los fotoperíodos incidiendo en distintos momentos de su ciclos vegetativos, modificándose las fechas de siembra de manera adecuada o artificialmente, mediante la técnica cultural de cámaras climáticas simples o complejas, con o sin acompañamiento de otros elementos bioclimáticos, como temperatura, humedad, etc.

La reducida intensidad lumínica requerida por la acción fotoestimulante, hace posible que la luz de la luna, aunque sea muy poco intensa, en sus fases creciente y luna llena, actúe como estímulo para provocar la entrada al proceso reproductivo en las especies de día largo. La luz lunar prolongaría o alargaría el fotoperíodo diario, eliminando así la interrupción que ejerce la oscuridad nocturna. Pareciera delinear una cierta analogía entre los fenómenos del fotoperiodismo y los efectos de la luna. Azzi consideró que en plantas de día largo, el período que transcurre entre el final de la luna nueva hasta la luna llena favorece el desarrollo reproductivo, mientras que el período lunar restante favorece el crecimiento de hojas y bulbos. Esto último sería conveniente en especies hortícolas de las que se comercializan órganos vegetativos y que, además, son de ciclo corto (por ejemplo, lechuga, rabanito, cebolla, etc.). Por ello, una técnica muy utilizada y difundida por los agricultores es realizar la siembra o el trasplante de estas producciones durante el período oscuro de las fases lunares, de forma de obtener el mayor crecimiento antes de la entrada en floración (Azzi, 1959).

## 2 Temperatura del suelo

Las variaciones en tiempo y profundidad que presentan la temperatura y el contenido de agua del suelo agrícola, cuyo conjunto constituye el “clima edáfico”, ejercen gran influencia directa e indirecta sobre los procesos biológicos y productivos de los cultivos agrícolas.

La temperatura del suelo regula el intercambio gaseoso a nivel de la superficie activa, afecta el movimiento y viscosidad del agua edáfica y la densidad de la solución salina y, por tanto, la absorción hídrica y nutricional (Tindal *et al*, 1990).

La temperatura del suelo afecta importantes procesos biológicos:

### A) Germinación

La germinación de las semillas y la velocidad de crecimiento de raíces, bulbos y tubérculos, la absorción hídrica y nutricional, etc. En forma indirecta, su acción se manifiesta sobre las reacciones químicas y sobre la actividad de los microorganismos encargados de la mineralización de la materia orgánica, así como la de hongos, insectos y demás formas biológicas presentes en el suelo (Tessi, 1978; Villaseca, 1990).

En condiciones normales de humedad en el lecho de siembra, el tiempo de germinación de las semillas de cereales depende del nivel de la temperatura del suelo. El subperíodo siembra-nacimiento del trigo puede durar 30-35 días a 5°C y sólo 5-6 a 15°C (Azzi, 1958). La germinación del maíz se produjo a los 45 días desde la siembra a 10°C de geotemperatura y solamente tardó 5 días a 25°C (Venzkevich, 1981). La Fig. XV.6 muestra la duración del subperíodo germinación-nacimiento en trigo (Geslin, 1944).

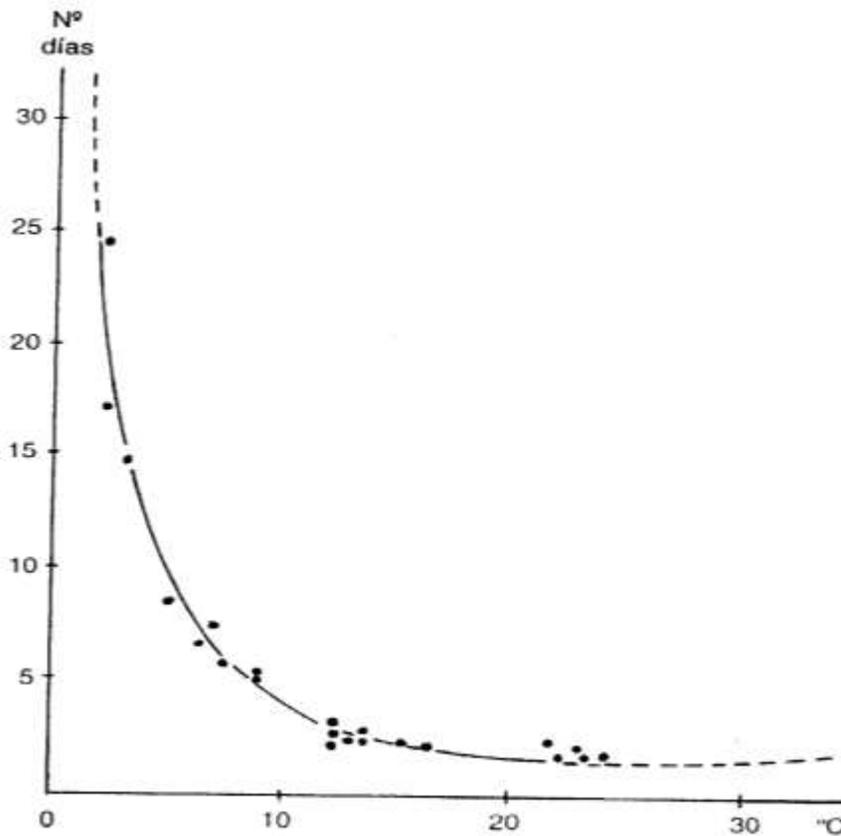


Figura XV. 6: Duración en días del Subperíodo germinación – nacimiento en trigo según la geotemperatura (Geslin, 1944)

#### B) Crecimiento de las raíces

La temperatura más favorable para el crecimiento de las raíces de los cultivos de regiones templadas parece oscilar entre los 15 y 28°C, aunque en ello influyen notoriamente las condiciones de aireación y humedad. Geotemperaturas demasiado elevadas reducen la velocidad de formación y cantidad de raíces, especialmente en condiciones de suelos con poco oxígeno. Raíces de maíz en un suelo poco aireado y con temperatura edáfica de 25 a 30°C, disminuyó su intensidad de crecimiento en una cuarta parte en relación con lo ocurrido en un suelo bien oxigenado (Weber y Clement, 1938).

La profundidad normal de raíces de cada cultivo parece estar relacionada con una temperatura óptima. Aquellos cultivos que desarrollan raíces muy superficiales, como lo son muchas hortalizas, pueden exigir geotemperaturas más elevadas que la de los que arraigan profundamente.

Temperaturas de suelo anormales pueden afectar la síntesis de sustancias de crecimiento producidas por las raíces y utilizadas en otras partes de la planta (Tesi, 1978). Dentro de ciertos límites, la intensidad de la fotosíntesis es independiente de la temperatura del suelo, pero su aumento tiene una relación directa con la respiración y, por ello, los niveles térmicos elevados en la capa radical afectan la translocación de los fotosintatos hacia las raíces, tallos u hojas. (Li *et al.* 1994).

#### C) Daños en tallos

Altas temperaturas en la superficie del suelo, pueden ocasionar daños en los tallos de cereales y demás cultivos, especialmente en condiciones de sequía. El daño depende del estado fenológico; el trigo, por ejemplo, en el estado de comienzo de encañazón es muy sensible a geotemperaturas muy elevadas, pudiéndose dañar el primordio floral.

Los tubérculos de papa se desarrollan óptimamente a 17°C, pero con geotemperaturas altas sufren degeneración o dejan de formarse cuando se alcanzan los 7-30°C (Doroshenko *et al.*, 1930; Tizio *et al.*, 1954).

D) Materia orgánica

La intensidad de descomposición de la materia orgánica en la capa arable, aumenta rápidamente con el aumento de la temperatura del suelo (Klages, 1942). La mayor parte de las bacterias del suelo se inactivan a geotemperaturas inferiores a 5-7°C. Temperaturas de 15-20°C aceleran la descomposición bacteriana de la materia orgánica con producción de nitratos asimilables (Tesi, 1978; Villaseca, 1990). Esta actividad bacteriana cesa a temperaturas mayores a 35-40°C (Weaver y Clements, 1938).

E) Microorganismos

Los nódulos en las leguminosas, producidas por la simbiosis con *Bacillus radicola*, muestran mayor desarrollo con geotemperaturas favorables. En soja, el peso seco de los nódulos aumenta rápidamente cuando la temperatura del suelo pasa de 15° a 24°C. y después disminuye progresivamente. De igual forma, alfalfa, tréboles y arvejas producen máxima cantidad de nodulaciones en geotemperaturas cercana a los 24-25°C (Shaw, 1952).

F) Enfermedades

La temperatura del suelo también es importante en el desarrollo y virulencia de los micelios de hongos causantes de enfermedades a las plantas. La marchitez del lino y el tomate (*Fusarium*) es máxima a 25-28°C y nula por encima de los 38°C. Inversamente, temperaturas bajas de suelo, entre 17 y 23°C favorecen la infestación de la "podredumbre del tabaco" (Weaver y Clement, 1938).

Asimismo, la temperatura del suelo incide en la distribución o área de dispersión de enfermedades criptogámicas. Por ejemplo, la región norte de los EE.UU. es afectada por la infestación y desarrollo del "carbón o tizón de la cebolla" (*Urocystis cepulae*), porque en el tiempo de plantación la temperatura del suelo es inferior a los 28°C, que es el límite superior térmico crítico para la germinación de los esporos. En cambio, su desarrollo está totalmente inhibido en los Estados del sur, donde se supera esa temperatura. (Bourke, 1955).

G) Insectos, ácaros y nematodos

La vida y los procesos de metamorfosis de una gran cantidad de insectos, ácaros y nematelmintos se relacionan con la temperatura del suelo. Por ejemplo, el "escarabajo japonés" (*Popilia japonica* Newman) plaga importante de los cultivos en algunos países de Oriente, en Canadá y en ciertos estados de EE.UU. Sólo puede establecerse y prosperar en los lugares donde las temperaturas del suelo le sean favorables durante las etapas vitales que pasa enterrado. Los niveles térmicos edáficos más bajos para huevo, larva y pupa son 15°, 20° y 13°C, respectivamente. Necesita pasar su ciclo vital completo en el suelo a temperaturas de 17 a 28°C a 10 cm de profundidad. La pupación es inhibida o muy prolongada cuando la temperatura sobrepasa los 18°C. A temperatura constante mayor de 28°C las larvas mueren en su metamorfosis a pupa (WMO, 1958).

H) Desarrollo y rendimiento

En ciertos cultivos, parece que la temperatura del suelo en la fecha de siembra y días posteriores tiene efecto sobre el futuro desarrollo y el rendimiento final. Wang (

1958), afirma que en Iowa hay un aumento lineal del rendimiento de maíz con la temperatura de suelo desde los 14°C hasta los 28°C y luego disminuye. Además, encontró que hubo una relación directa entre las geotemperaturas a 2,5 cm de profundidad en los primeros 13 días después de la fecha de siembra y la duración del subperíodo siembra - maduración, lo que atribuye a un efecto de la temperatura sobre los primordios florales del embrión.

### 3 Temperatura del aire

Como expresión de la disponibilidad energética y de la intensidad del intercambio calórico en la biosfera, la temperatura del aire es el índice utilizado para interpretar las transformaciones de masa y estructura que caracterizan el ciclo biológico vegetal.

Es el elemento meteorológico y climático más importante en el crecimiento y el desarrollo de los vegetales determinando, en gran medida, la distribución geográfica de las comunidades botánicas naturales y la de los cultivos agrícolas. Desde mediados del siglo XVIII se estudian científicamente sus efectos sobre los procesos fitobiológicos, con avances crecientes en el conocimiento de su forma de actuación en los sistemas, para cuantificar su efecto sobre las variaciones fenológicas de los cultivos agrícolas.

La acción biometeorológica de la temperatura se manifiesta, ya sea por la intensidad de sus valores actuales y extremos, por la permanencia y continuidad en niveles específicos o por la amplitud de las variaciones que registran su marcha diaria y anual.

Es así que sus efectos sobre los vegetales en general, y sobre los cultivos agrícolas en particular, pueden resultar decididamente favorables, auspiciando la excelencia del crecimiento y el desarrollo en la forma conocida como "acción positiva" o, por el contrario, producir alteraciones del ciclo o situaciones de sumo riesgo, capaces de llevar a la destrucción parcial de órganos, o hasta la muerte del vegetal, en lo que se ha dado en llamar "acción negativa" o tanatoclimática de la temperatura.

#### 1. Acción positiva sobre el crecimiento

La acción de la temperatura del aire sobre los procesos de crecimiento, se opera principalmente por su magnitud a través de las conocidas "*temperaturas cardinales*". La intensidad de crecimiento relativo, señalada en la escala de ordenadas de las curvas de la Figura XV.7, se corresponde con las temperaturas cardinales de crecimiento para maíz y trigo indicando, para cada intervalo térmico mantenido en forma constante, el aumento de la cantidad de materia seca formada por unidad de tiempo.

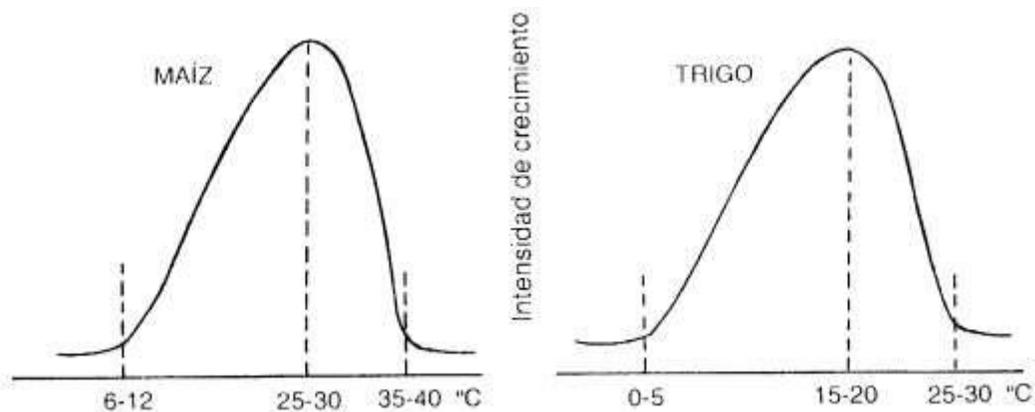


Figura XV.7: Puntos cardinales de la temperatura para el crecimiento del maíz y el trigo.

En condiciones de ilimitada provisión de intensidad lumínica e hídrica, la temperatura del aire condiciona el tercer proceso integrante de la fotosíntesis, es decir el proceso bioquímico para la reducción de  $\text{CO}_2$  y su difusión en el interior del mesófilo. Asimismo, la temperatura actúa favoreciendo la intensidad respiratoria, por lo que el balance entre la formación de materia por fotosíntesis y el consumo por respiración explicaría la curva de temperaturas cardinales de crecimiento.

Cada cultivo manifiesta distintos valores térmicos para cada punto cardinal, los cuales también pueden variar dentro de ciertos límites según otras condiciones acompañantes para el crecimiento pero, atendiendo a los dos grandes grupos de cultivos anuales pueden señalarse, para los cultivos invernales, como son los cereales (trigo, avena, cebada, centeno), hortalizas (repollo, espinaca, haba, arveja, lenteja), forrajeras (tréboles, vicias, agropiro) e industriales (lino, colza) los niveles térmicos de  $5^\circ$  y  $35^\circ\text{C}$  como valores auxégenos para el comienzo y fin de crecimiento, y entre  $23^\circ$  y  $25^\circ\text{C}$  para el rango de temperaturas óptimas.

Para cultivos anuales estivales, los respectivos valores son  $10^\circ$ - $45^\circ\text{C}$  y  $30^\circ$ - $32^\circ\text{C}$ , aunque el umbral de crecimiento mínimo es variable según las especies. Así, los  $10^\circ\text{C}$  o poco menos es umbral para las especies de menor exigencia calórica, como: girasol, arroz, tomate, maíz, mijo, poroto, alfalfa perenne, sorgo forrajero, etc. y los  $15^\circ\text{C}$  o más los son para aquellas especies decididamente megatérmicas, como: soja, tabaco, caña de azúcar, algodonero, alfalfa común, sorgo granífero, caupí, melón, batata, berenjena, etc.

Para los cultivos frutales se acepta que el nivel de brotación se extiende desde los  $10^\circ\text{C}$ , como en el caso de los criófilos de floración temprana (almendro, ciruelo) pasando por los de floración más tardía (manzano y vid), hasta los  $15^\circ\text{C}$  que podría ser el nivel térmico a considerar para los termófilos (citrus, mango, palma datilera, etc.).

***Los valores térmicos indicados precedentemente, se refieren principalmente al crecimiento en materia verde y, por supuesto, no son absolutos sino que en cada situación natural pueden variar según las condiciones externas y el grado de humidificación celular.***

En los estudios biometeorológicos, las observaciones destinadas a registrar cualquier manifestación de crecimiento, se realizan periódicamente a intervalos fijos, y el resultado se expresa en función de la temperatura media del período o por la acumulación de las temperaturas medias de los días comprendidos en el intervalo.

La acción positiva de la temperatura en el vegetal debe interpretarse como los sucesivos aumentos de materia seca que hace posible la actuación de otros aspectos térmicos y la de otros factores biometeorológicos que intervienen en el proceso fásico. Las plantas van incrementando su crecimiento y, simultáneamente, preparándose para satisfacer las necesidades bioclimáticas de los subperíodos integrantes del ciclo total, sea en cultivos anuales o perennes.

## *2. Acción positiva sobre el desarrollo*

A diferencia del crecimiento, donde el incremento diario o periódico se puede medir fácilmente, sea como aumento de altura, superficie, tamaño, peso o contenido, la cuantificación del cumplimiento del desarrollo sólo puede evaluarse por la duración en días de los subperíodos y la energía de fase que los caracterice. Por esta circunstancia, se torna dificultoso poder revelar la acción anaptígena de la temperatura considerada

solamente como indicadora de la disponibilidad energética, en primer lugar por su relación con el crecimiento y, secundariamente, porque para ciertas manifestaciones del desarrollo actúa conjuntamente con otros factores biometeorológicos. Además, la temperatura manifiesta otros efectos anaptígenos que los puramente calóricos. En muchos cultivos, la variación térmica diaria y anual influye en la expresión de la floración, en otros, la posibilidad de un correcto desarrollo está supeditada a que durante una etapa de su ciclo anual las plantas reciban una adecuada cantidad de enfriamiento durante una etapa de su ciclo anual.

Crecimiento y desarrollo son dos procesos indivisos y su consideración como etapas diferentes dentro del proceso vital y productivo sólo es ficticia. Es común considerar que el desarrollo comienza con la primera manifestación de la etapa reproductiva, pero debe recordarse que en las plantas anuales, los órganos reproductivos están preformados en el embrión de la semilla y su manifestación visible se produce por el sólo efecto de crecimiento. Por ser el ciclo una sucesión de fases, es decir, la visualización de un cambio en la apariencia externa del individuo, el primer cambio corresponde a la germinación o a su expresión visible, el nacimiento o visualización sobre el suelo. De allí, continúa un proceso de puro crecimiento hasta que la flor o la espiga se hagan visibles. En el cultivo de trigo, la fase de encañazón marca la transición entre la etapa puramente vegetativa y la reproductiva. El “doble lomo” o expresión fisiológica de iniciación del desarrollo se puede determinar al microscopio pero en Bioclimatología Agrícola, la observación fenológica correspondiente es el momento que los macollos comienzan a alargarse, y presentan a nivel del suelo una caña (órgano nuevo) de aproximadamente un centímetro, portando en su extremo una espigueta de 1 ó 2 mm de longitud. Su expresión es una característica varietal y consecuencia de la satisfacción de las necesidades de frío y fotoperíodos cortos anteriores a esa fase. Con posterioridad, el alargamiento de las cañas es un proceso de crecimiento, favorecido por temperaturas en aumento hasta el momento en que, habiendo satisfecho su dosis de necesidad calórica y fotoperíodo adecuado, la temperatura actuando a manera de estímulo, concreta la fase de la espigazón.

En el cultivo de trigo es común contabilizar la acción anaptígena de la temperatura en el subperíodo nacimiento-espigazón por la cantidad que resulta de sumar durante su duración, todas las temperaturas medias diarias, descontadas o no de un cierto valor, (temperatura base) acumulación a la que se llama “suma de temperatura” o “suma de unidades calóricas”.

Esta forma de valorar la acción positiva de la temperatura en el desarrollo adolece de algunos defectos. En primer lugar porque las exigencias cambian durante el subperíodo; al principio se manifiesta la exigencia en bajas temperaturas y luego, por el contrario, requiere disponibilidad calórica en aumento. Además, la temperatura del aire no es un indicador adecuado de la carga calórica ambiente y, por otra parte, su expresión por valores medios enmascara las variaciones diarias y horarias de la marcha térmica.

En los cultivos anuales de verano, sin o con reducida exigencia fotoperiódica, la temperatura permite explicar convenientemente las distintas etapas del desarrollo, con interacción reducida de la condición de humedad edáfica, de reducida acción en el proceso fásico, pero repercutiendo mayormente en el crecimiento y cantidad de rendimientos, y especialmente cuando ocurren deficiencias hídricas durante el “período crítico” para agua. En cultivos tales como maíz, arveja, maní o girasol, entre otros, la duración de la etapa vegetativa puede definirse por la expresión de un solo elemento – la temperatura – considerada como suma de temperaturas o unidades calóricas necesarias

para completar el ciclo de nacimiento a cosecha. En el de soja, en cambio, es imposible precisar exigencias térmicas generales de la especie durante su ciclo, porque sus cultivares reaccionan a la interacción termo-fotoperiódica de una manera particular. El subperíodo nacimiento- floración, es influenciado conjuntamente por la acumulación de temperaturas y por el fotoperíodo. Con siembras continuas, se comprobó que el fenómeno regular de la duración del día es responsable de la variabilidad de las sumas de temperaturas necesarias para alcanzar la floración. En cambio, en el subperíodo floración-caída de hojas, coincidente con la maduración de los frutos, los elementos del clima responsables del proceso son la temperatura y la humedad, no incidiendo de manera alguna la acción del fotoperíodo. La duración de esta segunda etapa del ciclo es un proceso típicamente de crecimiento de tejidos y su posterior desecación previa a la cosecha. Cualquier variación en la marcha térmica normal y, especialmente, en el contenido hídrico del suelo produce oscilaciones tanto en la duración como en la suma de temperaturas para cumplir el ciclo (Pascale y Escalles, 1971,1975).

### 3. Acción positiva de las bajas temperaturas

En mayor o menor grado, durante una etapa de su ciclo, los cultivos herbáceos invernales y las especies arbustivas y arbóreas caducifolias tienen un requerimiento de enfriamiento con temperaturas levemente por encima o por debajo de su cero vital crecimiento que, si no se satisface, repercute desfavorablemente en el comportamiento fásico posterior. Se trata de un requerimiento biometeorológico fundamental para el normal cumplimiento del desarrollo.

#### a. En cultivos anuales

Una gran cantidad de especies cultivadas como son los cereales invernales, muchas hortalizas y forrajeras, ciertas plantas bulbosas y de tubérculos, etc., reconocen el efecto vigorizante y acelerador de las bajas temperaturas sobre el desarrollo.

A pesar de que este efecto es conocido hace mucho, recién a principios del siglo pasado pudo demostrarse la existencia de un período de reposo en especies anuales como el trigo, que necesita la acción de una termofase negativa de cierta intensidad para poder manifestar un proceso fásico normal.

Los cultivos de cereales invernales son paratermocíclicos y para-fotocíclicos, es decir, tienen tejidos activos a la temperatura y al fotoperíodo en ambas fases de variación anual, aunque sin completarlas. En la primera parte de su ciclo deben cumplir sus requerimientos en bajas temperaturas y fotoperíodos inferiores a 12 horas.

Gassner (1918) fue el primero en demostrar experimentalmente que la diferencia entre las formas otoñales y primaverales de los cereales, no responde a la duración del ciclo vegetativo, sino a la necesidad que tienen los primeros en recibir en el campo durante el otoño e invierno la influencia de un período de bajas temperaturas, sin el cual no pueden entrar a la etapa reproductiva. Sometiendo a temperaturas entre 0° y 2°C, artificialmente a plantitas recién nacidas de trigo, avena y centeno durante tiempo variable, descubrió que el enfriamiento ocasiona la transformación de una forma otoñal en primavera.

Este conocimiento y las investigaciones de Gardner y Allard (1920) sobre fotoperiodismo, permitieron a Lysenko (1925) desarrollar la "teoría estadal" en trigo, e introducir la técnica que llamó "vernalización", para complementar artificialmente la exigencia en frío de trigos otoñales, manteniendo a las semillas germinadas durante una cantidad variable de días a la acción de bajas temperaturas, poco superiores a los 0°C.

Es por ello que a partir de Lysenko el requerimiento en bajas temperaturas de los cultivos invernales es conocido como “requerimiento o necesidad de vernalización”.

Según el esquema propuesto por Hansel (1953) para centeno, posible de extender a los otros cereales invernales, la acción enfriante de la temperatura muestra su mayor efectividad en el rango entre 1° y 7°C, indicada en la Figura XV.8

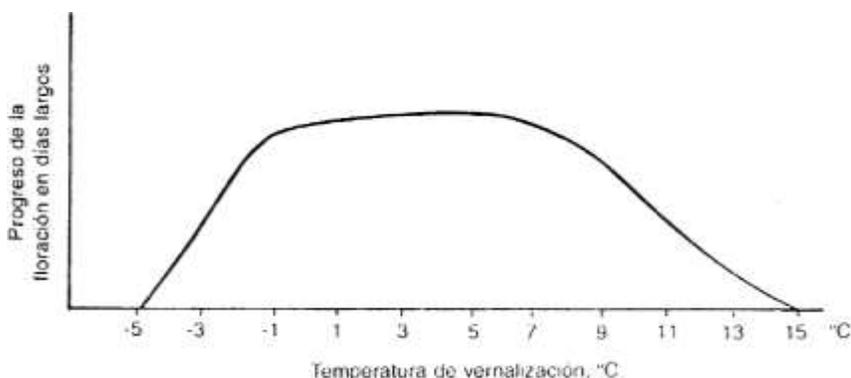


Figura XV. 8: Adelanto de la espigazón en el centeno invernal Petkul según la intensidad de vernalización. Hansel, 1953)

Entre las especies invernales y sus cultivares, existen diferencias en lo que se refiere a la intensidad del requerimiento en frío, así como en la duración del período de enfriamiento. Si en agroclimas adecuados se siembran en época oportuna, satisfacen en forma completa sus requerimientos de frío a partir del nacimiento, sin mostrar ninguna anomalía fenológica o fenométrica, más evidentes cuanto más se atrasan las siembras hacia la primavera.

La diferencia entre las siembras que no han satisfecho su requerimiento con las que pudieron hacerlo, se evidencia en manifestaciones fenológicas del desarrollo, como atraso en la aparición y menor energía de las fases, alargamiento de la duración de los subperíodos y hasta posible interrupción del ciclo, así como en otras características morfológicas, como menor altura de plantas, menos macollos fértiles, espigas más pequeñas, etc., todo lo cual repercute en la disminución del rendimiento final.

En los cereales invernales, el período en que se puede satisfacer naturalmente en el campo su requerimiento en bajas temperaturas se inicia con la germinación y se extiende hasta el comienzo del encañazón. Dentro de ese subperíodo la alternancia de días con temperaturas favorables a la vernalización y días con temperaturas fuera del rango indicado, producen modificación en el grado de satisfacción, en frío. Temperaturas menores, pueden interrumpir el proceso, mientras que las mayores provocarán una reducción del efecto favorable ya acumulado, mediante el efecto conocido como “devernalización”.

La alternancia de temperaturas altas y bajas que caracteriza a los regímenes climáticos del Hemisferio Sur, determinó el fracaso de los cultivares de trigos invernales llegados con la inmigración europea. A partir de ese germoplasma introducido, se obtuvieron nuevas formas que se consolidaron como cultivares adaptados a las condiciones climáticas de la Región Pampeana. De acuerdo con estudios bioclimáticos realizados, los trigos argentinos pudieron clasificarse como semiprecoces y semitardíos, diferenciándose así de los primaverales e invernales del Hemisferio Norte.

Un ejemplo de cómo se afectan la espigazón de trigos con diferente nivel de exigencia en siembras tardías, mediante las diferencias en días entre material sin y con vernalización, en un ensayo realizado cinco estaciones agrometeorológicas en 1948, puede apreciarse en el Cuadro XV. 1.

Cuadro XV. 1: Días de adelanto de la fecha de espigazón en trigo vernalizados sembrados en 5 estaciones agrometeorológicas (siembra: 20 al 30 de septiembre de 1948)

	Balcarce (Buenos Aires)			Guatraché (La Pampa)			Castelar (Buenos Aires)			El Bolsón (Rio Negro)			Rafaela (Santa Fe)		
	V	T	D	V	T	D	V	T	D	V	T	D	V	T	D
38 M.A.	26-11	05-12	9	25-11	15-12	20	25-11	*	-	08-12	26-12	18	26-12	*	-
Klein 32	28-11	08-12	9	27-11	07-12	8	28-11	07-12	9	15-12	18-11	3	07-12	07-12	0
Klein Cometa	06-12	10-12	4	04-12	05-12	3	29-11	10-12	11	13-12	21-12	8			
Benvenuto Inca	25-11	27-11	2	25-11	29-11	4	25-11	26-11	1	06-12	10-12	4	29-11	04-12	5
Klein Éxito	28-11	28-11	0	25-11	29-11	4	25-11	28-11	3	12-12	16-12	4	09-12	15-12	6
Klein Orgullo	30-11	03-12	3	01-12	03-12	2	29-11	03-12	4	13-12	18-12	5	19-12	26-12	7
Eureka F.C.S.	27-11	30-11	3	30-11	01-12	1	01-12	01-12	0	09-12	09-12	0	16-12	16-12	0
Buck Quequén	03-12	03-12	0	03-12	03-12	0	06-12	06-12	0				29-12	29-12	0
Sinvalocho M.A.	23-11	23-11	0	23-11	25-11	2	18-11	20-11	2	04-12	06-12	2	25-11	27-11	2
Bahiense F.C.S.	26-11	26-11	0	28-11	29-11	1	25-11	25-11	0	08-12	08-12	0	04-12	04-12	0

b) En cultivos perennes arbóreos

Puede atribuirse a Coville (1920), la formulación concreta del esquema sobre la acción favorable de las bajas temperaturas durante el subperíodo fenológico de inactividad vegetativa visible en cultivos perennes, el cual se extiende desde el fin de caídas de hojas hasta el comienzo de la brotación en primavera. En este período de descanso por acción del frío, ocurren modificaciones dentro de las yemas preformadas en el verano anterior y, la transformación de ciertas sustancias inhibitoras en activadoras del crecimiento (Samish, 1954). La reiniciación normal del período vegetativo primaveral depende de que el enfriamiento requerido se complete totalmente. A las especies que manifiestan esta necesidad biometeorológica se las denomina "criófilas".

La falta de frío invernal suficiente para el cumplimiento de la etapa de descanso no solamente se presenta en las áreas geográficas con inviernos templados o calientes, pues también afecta a regiones donde los inviernos aun siendo frío, no reconocen una continuidad absoluta de las bajas temperaturas, o son acompañadas por condiciones que reducen su efecto "enfriante".

Condiciones de vientos y lluvias intensas (Tabuenca, 1975), gran amplitud térmica diaria (Couvillon y Erez, 1985), fotoperíodo o intensidad lumínica inadecuada, prácticas culturales (Garza Gutiérrez, 1970), etc., son todos factores que pueden modificar la efectividad del enfriamiento. Las temperaturas del verano precedente pueden también afectar la profundidad del descanso. Se sugirieron aumentos entre 10 y 50% de los requerimientos en frío después de un verano caliente y disminuciones de un 20 a 50% después de un verano fresco (Peereboom Voller, 1986).

El conocimiento de las exigencias en frío es importante sobre todo para las especies frutales, las que han merecido la dedicación preferente en los estudios sobre

este importante factor biometeorológico. Actualmente, ese conocimiento orienta la elección de especies y cultivares con mejores condiciones de adaptación, acorde a las disponibilidades de enfriamiento invernal de las diferentes áreas frutícolas.

Los efectos de la falta de frío se manifiestan sobre distintos órganos de las plantas (Ledesma, 1950).

- *Sobre las yemas:* durante inviernos calientes se produce la caída de yemas, tanto las de madera como las de flor y, teniendo en cuenta que las de madera son más exigentes en frío, la planta se despoja de estas. El orden de la caída comienza en las yemas laterales de las ramitas para producirse también la caída de las apicales, si la deficiencia en frío es grande. Finalmente, se llega a la muerte de la ramita por falta de yemas. Es común que los árboles frutales con falta de frío invernal broten solamente en los extremos de las ramitas, lo cual dificulta su poda.
- *Sobre la floración:* los inviernos calientes determinan un atraso en el comienzo de floración de los frutales criófilos, tanto mayor cuanto más elevada sea la temperatura, anomalía que se complementa con una "falta de energía de la fase", valorada por el número de días que transcurre desde la aparición de la primera hasta la última flor. Por ejemplo, un duraznero que cumpliría la floración en 15 días, luego de un invierno caliente puede tener una "energía de floración" de 30 días. Especies con muy poca exigencia en frío, en regímenes térmicos de temperaturas invernales favorables para el crecimiento, como los que se producen en gran parte del territorio argentino, conducen a comportamientos irregulares a especies del Hemisferio Norte. La lila -*Syringa vulgaris*- florece prácticamente durante todo el invierno, no siendo un indicador del inicio de la primavera tal como sucede en el Hemisferio Norte. En el avellano existe protandria de sus flores masculinas respecto de las femeninas más exigentes en frío; esta característica biológica es, en los inviernos calientes, más acentuada que lo normal para la especie, conduciendo a la esterilidad sin formación de frutos. Otra anomalía que se observa es la segunda floración que suele producirse en algunos frutales (peral) durante el otoño.

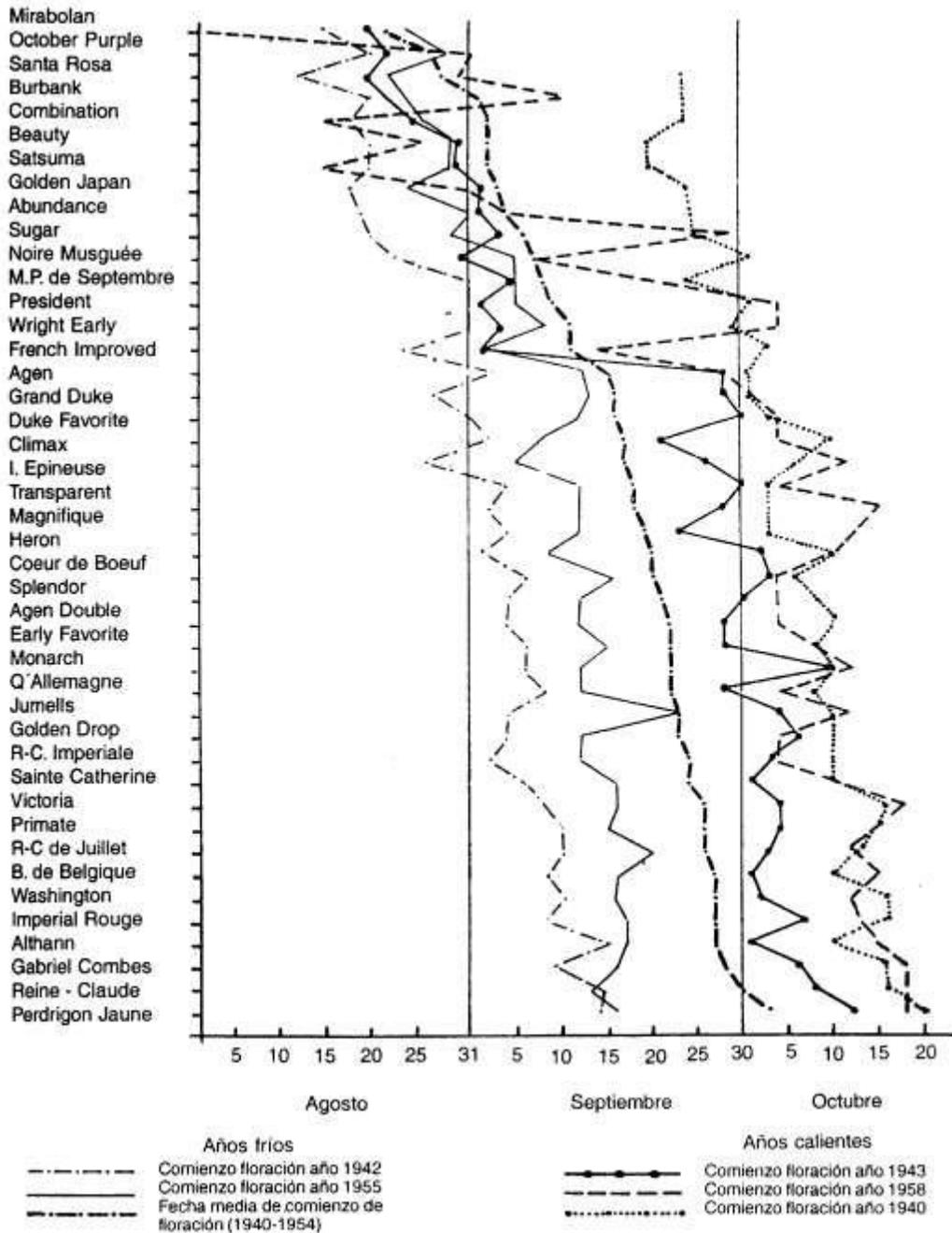
Como ejemplo del atraso en las manifestaciones fenológicas por la falta de suficiente frío, se puede mencionar el estudio sobre la influencia del rigor del invierno en la fecha de iniciación de la floración de los ciruelos integrantes de la colección del monte frutal que existía en esos años en la Facultad de Agronomía de Buenos Aires (Pascale y Ruggiero, 1963). Como se muestra en la **Figura XV.9** en los años con invierno frío, 1942 y 1955 hubo un adelanto con relación al promedio de los años 1940-54, más detectable cuanto más tardías son las variedades.

Por el contrario, en los años de invierno poco frío o caliente de 1940, 1943 y 1958, se registró un evidente atraso en la floración. Estas variaciones de la intensidad invernal no afectan a las 5 ó 6 variedades más precoces las que, por exigir muy poca dosis de frío para romper el descanso, pueden satisfacerlas aún con el poco frío disponible en años calientes. En las de floración mediana y tardía, la diferencia entre las fechas de mayor adelanto y mayor atraso, se extiende a más de 30 días, indicativo de cada particular exigencia en frío, aun considerando la pequeña influencia que hubieran podido tener las temperaturas favorables para el crecimiento de los días previos a la floración.

- *Sobre el fruto:* la caída de yemas florales, determina la existencia de menor cantidad de frutos sobre el árbol y, como el cuaje se produce a través de un período de floración dilatado, es común la existencia de frutos de tamaño y maduración desparejos.
- *Sobre la longevidad:* la existencia de menor cantidad de hojas y la falta de descanso, determinan la pérdida de vitalidad de las plantas sometidas a un régimen térmico invernal favorable para el crecimiento. Las fases se superponen, siendo común observar en el

norte de la Argentina durazneros durante el invierno con ramas en descanso, otras floreciendo y, también, con frutos de distintos tamaños, todo lo cual lleva a períodos de vida útil de las plantas inferiores a los que normalmente tienen en áreas con inviernos suficientemente fríos.

Figura XV.9: Comienzo de floración de ciruelo en la Facultad de Agronomía (1963).



- *Sobre el rendimiento:* Todas las deficiencias señaladas sobre los órganos de las plantas y sobre el proceso biológico, concluyen en una disminución del rendimiento final. Este aspecto fue señalado por Ledesma cuando correlacionó la cantidad de canastos de fruta entrados al puerto de Tigre (Buenos Aires) con relación a las horas de frío registradas en el Delta, obteniendo alta correlación con los de manzanas y peras, indicadas por índices más elevados cuando los años eran más fríos.

#### **d. Acción positiva de la temperatura por su variación diaria y anual**

La influencia de la amplitud térmica en el desarrollo de las plantas conduce al concepto de *termoperiodismo*, entendiéndose por tal a la acción que ejerce la variación anual, diaria y asincrónica de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo de los vegetales.

Como antecedentes de la influencia de la amplitud térmica, pueden señalarse las observaciones efectuadas por Humboldt sobre el distinto vigor y tipo de vegetación en Europa con iguales temperaturas medias pero distinta distribución, y las de Darwin, quien en su viaje alrededor del mundo observó el contraste de la vegetación sobre una misma latitud pero con distinta amplitud anual de la temperatura. A su vez, el fenómeno de *intercepción fonológica* debe atribuirse a esta influencia de la temperatura siendo un ejemplo elocuente, el caso de la distinta brotación del fresno y el roble. En el noreste de Europa, más frío y de verano fresco, el fresno brota antes que el roble, mientras que en el Mediterráneo, más caliente, el roble brota dos meses antes que el fresno.

En la introducción de especies es fundamental, el conocimiento de la amplitud térmica anual su lugar de origen. Si el lugar de recepción de las especies posee amplitudes anuales distintas los fracasos serán comunes, por ejemplo, lo acontecido con las plantas de follaje caduco o frutales y los trigos traídos del Hemisferio Norte al Hemisferio Sur. En cambio, el manzano originario de Asia Media introducido al Estado de Washington (EEUU) y la papa originaria de la isla de Chiloe (Chile) a Irlanda, determinaron un acostumbamiento total a las nuevas condiciones, debido a condiciones de amplitud térmica anual similar. En la Argentina el manzano encuentra satisfecha sus exigencias bioclimáticas de amplitudes térmicas anual en el Valle de Río Negro, pero no en el Delta del Paraná, donde su producción es pobre y sus frutos de escasa calidad.

*El termoperiodismo diario* considera la influencia de la variación diaria de la temperatura. En las plantas atermocíclicas esta influencia se manifiesta por sí misma, por ejemplo, la destrucción que producen de los tejidos las temperaturas bajas o altas letales. En el resto, especialmente en las termocíclicas, la acción de la amplitud diaria debe interpretarse como de interferencia con el termoperíodo anual. Ejemplos de influencia de las bajas temperaturas diarias pueden señalarse en el digital, especie que no florece con temperaturas constantes y el guayule que necesita descensos nocturnos para acumular caucho. En tomate, se pudo comprobar que temperaturas constantes de 26°C, tanto diurnas como nocturnas, no producían floración, siendo necesario hacer descender la temperatura nocturna para que las plantas entraran en desarrollo; la mejor amplitud diaria fue de 26°C diurnos y 18°C nocturnos (Went, 1944).

En el termoperiodismo diario tienen mucha influencia los valores térmicos diarios, aspecto señalado por Gregory (1936) en una especie paratermocíclica. Un centeno invernal verbalizado a 1°C durante 42 días perdía esa condición cuando esa semilla pregerminada se colocaba durante 10 días a 20°C o sólo con 8 horas a 40°C. Este proceso se llamó *devernalización*, siendo de carácter reversible, pues una semilla

devernalizada puede volver a vernalizarse. Este conocimiento resulta de gran importancia en aquellos regímenes climáticos en los que las temperaturas invernales no se mantienen permanentemente frías, sino que se alteran con ondas de temperaturas favorables para el crecimiento, las que pueden anular el efecto vernalizante de las temperaturas previas enfriantes. Así, es relevante señalar la importancia de la satisfacción en frío en forma masiva, frente a la que puede ocurrir alternadamente con una sucesión de días fríos y otros calientes, por lo cual, tiene verdadero sentido la distinta calificación adjudicada por Richardson *et al.* (1974) a las temperaturas horarias en sus Unidades de Enfriamiento.

La ocurrencia de temperaturas nocturnas suficientemente bajas son importantes para los cultivos de papa, de ají picante, de tabaco, etc. Las áreas exitosas de cultivo de papa se encuentran principalmente en las latitudes medias y altas, pues la temperatura óptima de tuberización es aproximadamente de 12°C.

Las temperaturas que se registran durante el día son críticas para algunos cultivos como la arveja y la frutilla, tanto para el crecimiento como para la fructificación. La amplitud es lo más importante, cualquiera sean los valores de la temperatura diurna o nocturna. La concentración de sucrosa en remolacha y caña de azúcar aumenta con el descenso de la temperatura nocturna. Para la frutilla resulta crítica la temperatura diurna pues si es alta los frutos serán sin aroma ni sabor. Para desarrollar esta última característica debe madurar con temperaturas de alrededor de 10°C, de allí, que las maduraciones a comienzo de estación sean las mejores. Esta característica de excelente aroma y sabor es propia de la frutilla que se obtiene en altas latitudes, donde se cumplen las necesidades térmicas diurnas luego de noches estivales frías.

El *termoperiodismo asincrónico* es la reacción particular de ciertas especies vegetales frente al comportamiento aperiódico de la temperatura. La temperatura tiene una marcha regular hacia un valor máximo en el año y luego un descenso hasta un valor mínimo. Cuando esa marcha periódica se produce irregularmente se presenta una temperatura aperiódica o asincrónica provocada por advecciones de aire con temperaturas mayores o menores que las del lugar, que enmascaran el valor de la insolación de esa fecha.

Las variaciones asincrónicas de las temperaturas invierno-primaverales, actuando sobre las especies que tienen poca exigencia en frío y bajo umbral térmico de brotación, son la causa de su termoperiodismo asincrónico. Por ejemplo el almendro, frutal de reducida exigencia en frío, satisface su necesidad bioclimática de descanso invernal con los primeros descensos de temperatura. La ocurrencia de picos de temperaturas elevadas actúa como estímulo para la brotación y las plantas florecen en pleno invierno por haber ya logrado el estado de disposición correspondiente. Si las condiciones térmicas siguen favorables pueden continuar el crecimiento, producirse la fecundación de las flores y hasta formarse pequeños frutos que pueden ser destruidos posteriormente por heladas de ocurrencia normal en invierno-primavera. Caso similar sucede con el avellano, ya mencionado, pues las primeras bajas temperaturas otoñales o de comienzos de invierno satisfacen los requerimientos de sus amentos masculinos, los que florecen y pueden llegar a producir polen antes de estar receptivos los estigmas de la flor femenina que tienen mayor requerimiento en bajas temperaturas. Se determina así una protandria acentuada y una esterilidad permanente en áreas de temperaturas asincrónicas debido a la destrucción prematura de los órganos masculinos por descensos térmicos posteriores, naturalmente posibles.

Ciertas especies no reaccionan al termoperiodismo asincrónico, sea por que tienen mucha exigencia en frío y/o por un umbral térmico de brotación elevado, caso

manzano. La vegetación natural se defiende también de los termoperíodos asincrónicos necesitando una temperatura alta para su brotación pero manteniendo una reducida exigencia en frío, la que puede satisfacer con el invierno relativamente caliente de su área de dispersión. Esta es la razón de la floración tardía, o en el verano, de las especies subtropicales en el área de Buenos Aires (lapacho, tipa, jacaranda, pata de vaca, etc.).

Para áreas con regímenes térmicos asincrónicos, las características que deben aconsejarse a los fitogenetistas para ser incluidas en las nuevas creaciones de cultivares de especies agrícolas, son: baja exigencia en frío y nivel térmico de brotación elevado.

#### 5. Efectos negativos de la temperatura o efectos tanatoclimáticos

Cuando la temperatura del aire desciende por debajo de la mínima letal o supera a la máxima letal, los efectos sobre los tejidos vegetales pueden variar desde daños menores hasta la destrucción total, según sean las condiciones acompañantes, la duración de tales temperaturas, el estado fenológico, el contenido celular, etc.

Los efectos perjudiciales de las altas temperaturas críticas son difíciles de evaluar por sí solas, si no se consideran junto a otras condiciones externas, tales como alta intensidad de radiación, vientos secos y fuertes, deficiencias de humedad edáfica y baja humedad relativa del aire, etc. Cuando se cumplen algunas de estas condiciones y no se prolongan por demasiado tiempo, las plantas pueden entrar en un estado de marchitez temporaria del cual pueden recuperarse al revertirse las condiciones adversas extremas. Esta situación es un hecho común en verano, especialmente detectable en cultivos de hojas extendidas. Mientras suceden estas condiciones hay un mayor consumo de materia formada, debido a que la planta deja de crecer pues la fotosíntesis se detiene y aumenta la intensidad respiratoria. Si las condiciones adversas se repiten con demasiada frecuencia, la repercusión sobre la producción final puede ser importante. Sus efectos perjudiciales aumentan si coinciden con el estado de floración, cuando pueden impedir la formación de polen o su destrucción.

El sobrecalentamiento de las superficies foliares por altas temperaturas puede producir quemaduras, especialmente en condiciones de aire calmo, daño importante para cultivos hortícolas en los cuales las hojas constituyen la parte comercializable. Durante veranos muy cálidos, los frutales aceleran la maduración de sus frutos, los cuales resultan insípidos, sin aroma y con disminución en su calidad de conservación.

Aunque generalmente, el mayor perjuicio de las altas temperaturas se debe a su repetición durante varios días seguidos y a las condiciones acompañantes, temperaturas aisladas mayores a los 40°C, ocurriendo varias veces durante el ciclo, pueden causar situaciones de sequía fisiológica, sin manifestación visible en el estado de las plantas, pero que afectarán la cantidad y/o la calidad de la cosecha. Esta es la característica de los efectos de las altas temperaturas, que sólo en pocos casos producen daños apreciables inmediatamente. Se menciona, por ejemplo, que temperaturas sobre los 35°C producen en el girasol una disminución en el rendimiento y porcentaje de aceite (Klyuka y Tsukarni, 1975).

Las temperaturas por debajo de los niveles críticos de resistencia de los cultivos son fenómenos más comunes en las áreas agrícolas y, sus efectos, mucho mejor estudiados y conocidos que los de las altas temperaturas.

Se reconocen dos clases de efectos por bajas temperaturas: el helamiento o enfriamiento y el congelamiento. El primero (“chilling”), se refiere a los daños que pueden sufrir ciertos cultivos tropicales y subtropicales por descensos térmicos durante cierto período de tiempo por debajo de los 10°C, pero mayores de 0°C. Cultivos como el del cacao y el árbol del caucho (*Hevea*) son muy sensibles a temperaturas inferiores a los

15°C. Temperaturas entre 0° y 5°C, si se mantienen por muchas horas, pueden dañar severamente a cultivos de arroz, algodón o poroto. Bajo esas condiciones cultivos de maíz, soja y algunas hortícolas, acusarán daños de distinta severidad.

Pero los mayores perjuicios a los cultivos por ocurrencia de temperaturas inferiores a los niveles críticos de tolerancia son las que producen fenómenos de congelamiento hídrico en los tejidos, (“freezing”). Actualmente, se admite que la muerte de los tejidos y órganos vegetales es ocasionada por un proceso de carácter físico-químico que, en pasos sucesivos, puede llegar a la muerte de las células. El proceso comienza con la formación de hielo extra celular, en los espacios intercelulares. Por diferencia de presión, el agua de la célula es obligada a atravesar la membrana para ir a congelarse sobre el hielo ya formado. Paulatinamente se va produciendo la deshidratación del protoplasma que lleva a una plasmólisis celular. Si en una etapa inicial del proceso la temperatura no desciende más y, por el contrario, comienza a ascender muy suavemente permitiendo así un deshielo lento, la célula puede recobrar el agua perdida y su turgencia inicial y, en consecuencia, no se registrará daño alguno. Si en cambio el descenso térmico continúa, se producen alteraciones fisiológicas en el contenido protoplasmático que, en la mayoría de los casos, por ser irreversibles, terminan con la muerte de la célula.

La deshidratación protoplasmática primaria es la que produce la clásica marchitez húmeda y ennegrecimiento de los brotes tiernos observable en la mañana después de una helada.

Los límites de resistencia a temperaturas de helada son variables para las distintas especies, su sanidad, la etapa fenológica, la provisión hídrica, los contenidos celulares (los azúcares aumentan la resistencia), las condiciones acompañantes a la baja térmica, su duración, la secuencia en días sucesivos, etc. Entonces, los valores de límites críticos citados en la bibliografía, como los de los Cuadros XV.2 y XV.3 sólo tienen un valor relativo.

**Cuadro N° XV.2 Resistencia de cultivos a las heladas en las diferentes fases de desarrollo (Reproducida en forma reducida de Yentskevich, 1961 (°C))**

Cultivo	Nivel de resistencia	Temperatura dañina en la fase de		
		Germinación	Floración	Fructificación
Trigo	De alta resistencia	-9 -10	-1 -2	-2 -4
Avena		-8 -9	-1 -2	-2 -4
Lenteja		-7 -8	-2 -3	-3 -4
Lupino	Resistentes	-6 -8	-3 -4	-3 -4
Girasol		-4 -6	-2 -3	-3 -4
Lino		-5 -7	-2 -3	-2 -4
Cáñamo		-5 -7	-2 -3	-2 -4
Repollo	Medianamente resistentes	-5 -7	-2 -3	-6 -9
Soja		-3 -4	-1 -2	-2 -3
Maíz	Baja resistencia	-2 -3	-1 -2	-2 -3
Sorgo		-2 -3	-1 -2	-2 -3
Papa		-2 -3	-1 -2	-1 -2
Algodón	Muy baja o nula resistencia	-1 -2	-1 -2	-2 -3
Melón		-0,5 -1	-0,5 -1	-0,5 -1
Arroz		-0,5 -1	-0,5 -1	-0,5 -1

Tomate		0 -1	0 -1	0 -1
Tabaco		0 -1	0 -1	0 -1

**Cuadro N° XV.3: Niveles térmicos de daño de diferentes especies de plantas frutales, según diferentes autores (Copiado de Burgos, 1963)**

Especie	Temperaturas °C en los periodos				
	Descanso	Yemas cerradas mostrando color	Plena floración	Pequeños frutos verdes	Frutos maduros
Limonero	-3,3 -2,8 -5,6 -7,2		-1,1	-1,1	
Pomelo	-4,4 -5,0 -7,8 -8,9				-3,3 -2,0 -1,7
Naranja dulce	-7,4 -5,0 -7,8 -8,9			-2,5 -2,0 -1,5	-2,2 -1,7
Mandarino	-5,0 -5,6 -6,0				
Higuera	-9,4				
Higuera, Kaki	-10,0				
Alcornoque	-10,0				
Datilero	-11,0				
Vid	-17,0 -15,0	-1,1	-0,6	-0,6	
Duraznero	-26,1	-3,9	-2,8	-1,1	
Albaricoque	-26,1	-3,9	-2,2	-0,6	
Cerezo	-28,9	-2,2	-2,2	-1,1	
Peral	-28,9	-3,9	-2,2	-1,1	
Ciruelo	-34,4	-3,4	-2,2	-1,1	
Guindo	-34,4				
Manzano	-34,4	-3,9	-2,2	-1,7	

### Acción de la humedad edáfica

El contenido de agua del suelo o “*humedad edáfica*” actúa con acciones positivas y negativas sobre el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos.

Sus aspectos auxégenos y anaptígenos se vinculan con el contenido hídrico de libre disponibilidad, en virtud del cual la planta puede utilizar toda el agua que necesita para cumplir satisfactoriamente sus procesos vitales y productivos.

Como elemento tanatoclimático la humedad del suelo puede operar tanto por su deficiencia (situación de sequía edáfica), como por su exceso (situación de sobresaturación).

El agua es el mayor constituyente fisiológico activo de los tejidos de las plantas; interviene en la fotosíntesis; es el solvente en el cual las sales, los azúcares y otros solutos pasan de una célula a otra, de un órgano a otro; siendo un elemento esencial para el mantenimiento de la turgencia, necesaria para el crecimiento de la célula. Además, el agua es necesaria para la transpiración que, aunque no ejerce una función directa en el desarrollo de las plantas, desempeña otras de suma utilidad vinculadas a su ciclo vital.

Las deficiencias de agua no sólo reducen el rendimiento sino que también alteran la forma del crecimiento. En general, la profundidad de las raíces disminuye con el

aumento de la humedad del suelo, ya que con poca humedad las raíces tienden a profundizar, se hacen más finas y más largas. Los riegos frecuentes conducen a un crecimiento superficial de las raíces, lo cual resulta inconveniente durante las sequías.

Aunque se ha estimado que menos del 1% del agua que pasa por la planta es aprovechada en la fotosíntesis, las deficiencias en agua tienen un efecto acentuado sobre este proceso, pues el protoplasma deshidratado disminuye su capacidad fotosintética al no penetrar  $\text{CO}_2$  a través de los estomas cerrados por falta de turgencia de las hojas y, además, en tal circunstancia aumenta el nivel de respiración. En general, cuando el contenido de agua de las hojas disminuye un 30%, la fotosíntesis disminuye apreciablemente y, cesa cuando esa disminución llega al 60%.

La transpiración es regulada en las hojas mediante la apertura o cierre de los estomas. La regulación de la apertura y cierre de los estomas responde a la presencia de luz solar y la disponibilidad de agua en los tejidos de la hoja. En general, permanecen abiertos durante el periodo diurno, siempre y cuando no haya estrés de agua, que determinará su cierre.

La temperatura del aire también puede regular la apertura estomática. En muchas especies los estomas se cierran ante temperaturas mayores a los  $30^\circ\text{C}$ , para mantener el balance equilibrado entre fotosíntesis y respiración. A temperaturas de  $40^\circ$  o más, la planta pierde su capacidad regulatoria y, con aire seco y cálido, puede sufrir de estrés hídrico si los estomas permanecen abiertos.

No todas las especies abren y cierran sus estomas de igual manera, ni todos responden igualmente a las condiciones de temperatura y humedad del aire exterior.

Se dice que la transpiración es un mal necesario sin mayor utilidad para el crecimiento y desarrollo vegetal. Sin embargo, debe recordarse que el crecimiento se anula en condiciones de atmósferas saturadas, bajo las cuales es imposible la transpiración porque está impedida la difusión del vapor. De aquí puede derivarse que la transpiración es el factor para todas las formaciones y traslocaciones de materiales vegetales. Además, impide la ocurrencia de temperaturas excesivas sobre las hojas, pues altas temperaturas del aire puede producir daño en la vegetación por falta de enfriamiento (consumo de energía en la evaporación).

Si la transpiración es mayor que la absorción de agua, el balance hídrico de la planta es negativo, circunstancia que la planta puede evitar aumentando la expansión radicular o aumentando la fuerza de succión para obtener mayor cantidad de agua retenida por el suelo o cerrando los estomas.

Es común aceptar que a medida que aumenta la intensidad de transpiración aumenta la cantidad de materia seca formada. La interpretación, sostenido por muchos biólogos de que la transpiración es un fenómeno biológico estrechamente correlacionada con la acumulación de materia seca, fue desmentida cuando Penman (1948) publicó su trabajo fundamental sobre evapotranspiración. Allí desarrolló una interpretación totalmente distinta de la transpiración, asignándole una dependencia prevalentemente física condicionada por la situación ambiental y, en muy poco, por la fisiología de la planta. Según Penman: “Cuando la vegetación cubre totalmente el suelo y la disponibilidad de agua es ilimitada, la transpiración es independiente de la planta y sólo es gobernada por factores climáticos”.

A partir de que Thornthwaite (1944) creó el término “*evatranspiración*”, como pérdida conjunta de agua evaporada desde el suelo y transpirada por la vegetación, los estudios sobre utilización del agua de suelo por los cultivos se enfocan, por un lado

teniendo en cuenta solamente la influencia de los factores atmosféricos, y por el otro, los que consideran al movimiento del agua en el suelo.

Con cantidad de nutrientes e intensidad lumínica adecuadas, la disponibilidad hídrica condiciona la capacidad de los cultivos para la acumulación de fotosíntesis neta (Mattei y Petrongelli, 1973). En las de cultivo en secano la variación del contenido de agua en el suelo es el factor principal de los rendimientos.

Cuando se modifica la economía del agua de una planta y su balance de agua tiene una deficiencia, se dice que la planta sufre de “estrés hídrico” o “sequía”.

Las causas productoras de sequía son varias y se distinguen dos tipos: la edáfica y la fisiológica.

La *sequía edáfica* o sequía del suelo, ocurre cuando la cantidad de agua presente es insuficiente y es retenida por el suelo con tal fuerza que la planta no la puede absorber, cesa la transpiración y el crecimiento se detiene, los tejidos foliares se sobrecalientan, el protoplasma se plasmolisa, y se puede llegar a la muerte de la planta. La *sequía atmosférica* ocurre cuando altas temperaturas del aire van acompañadas de bajas humedades relativas y vientos desecantes. Bajo esas condiciones la planta aumenta su intensidad transpiratoria en tal medida que no puede reponer la cantidad de agua necesaria para mantener la condición hídrica celular por absorción radicular, aunque el contenido de humedad edáfica sea óptimo. Aquellas especies que bajo tales condiciones atmosféricas son capaces de cerrar parcial o totalmente sus estomas, no alcanzan a sufrir daños irreversibles, ya que a lo sumo, entran en un marchitamiento temporario, conocido como “*depresión del mediodía*”, del cual se reponen cuando desaparecen las condiciones adversas.

Los efectos de los periodos secos, más o menos prolongados, se manifiestan durante todo el ciclo cultural, desde la preparación del suelo hasta la maduración de los frutos, aunque el mayor efecto negativo sobre el rendimiento corresponde a su ocurrencia durante el periodo crítico para agua. La mayor afectación ocurre en los cultivos estivales, naturalmente exigentes en una mayor disponibilidad de agua edáfica para compensar los elevados índices de evapotranspiración potencial durante su crecimiento. Pero también los cultivos invernales o invierno-primaverales, cuyo crecimiento se cumple bajo magnitudes de evotranspiración más reducidas, resultan perjudicados por la falta de geohumedad adecuada.

Los efectos de la falta de agua se manifiestan precisamente sobre todos los procesos de crecimiento, sin afectar directamente al desarrollo cuyo cumplimiento depende esencialmente de las condiciones de temperatura y del fotoperíodo. Así, la menor velocidad y reducido porcentaje de germinación, la menor densidad y altura de las plantas, deficiencia en el llenado de granos y, por fin, rendimientos disminuidos, son el resultado de carencias parciales o totales en la provisión hídrica al cultivo.

En condiciones de sequía hay también un atraso en la iniciación de la fase puramente vegetativa del macollaje, y una reducción importante en el número de macollos, a pesar de la mayor duración de la fase.

La condición de humedad de suelo no influye directamente en el desarrollo del trigo, es decir que la fecha de espigazón no se modifica sustancialmente con las variaciones hidrológicas previas, pero el vigor del proceso, el tamaño y la cantidad de espigas fértiles será un resultado de las condiciones de crecimiento anteriores, y muy especialmente, de la humedad disponible en los 30 días anteriores al comienzo de la fase, que marcan el período crítico para agua del trigo (Azzi, 1939).

La formación y posterior evolución de los granos hasta la maduración final también se relaciona con la humedad de suelo. En los momentos de llenado de granos, una sequía edáfica acompañada de altas temperaturas y atmósfera seca, pueden provocar el “*achuzamiento*” de los mismos. Condiciones de excesiva humedad de suelo y aire en la maduración pueden ser perjudiciales, al demorar el desecamiento de los granos, con pérdida de su calidad industrial.

## 6 Acción de otros elementos

Se trata de acciones de menor importancia que las ejercidas por la de radiación, temperatura y humedad del suelo, pero que en algunos casos pasan a ser importantes. Si bien no existe abundante bibliografía al respecto, la carencia se debe a que no se ha encarado un estudio profundo y sistemático de su importancia bioclimática.

### Viento y humedad del aire

Por si mismo, el viento no es un factor esencial para la vida vegetal. Sin embargo, ejerce directa o indirectamente una serie de acciones que, de acuerdo a sus características e intensidad provocan efectos favorables o perjudiciales, tanto sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos como sobre otros actores biológicos y procesos agrícolas de la producción agropecuaria.

El efecto favorable de los movimientos de aire en la biosfera es importante como proveedor de CO<sub>2</sub> a la vegetación. La cantidad de CO<sub>2</sub> consumida en un día de verano por un cultivo de maíz en pleno desarrollo, comprende a la cantidad de este gas contenido en un espesor de atmósfera de 30 a 40 metros de altura (Monteith, 1966). Sobre la base de la concentración de CO<sub>2</sub> encontrado normalmente en las condiciones naturales, algunos autores estiman que la capa de donde las plantas pueden extraerlo, alcanza a los 1.000 m o más, lo que exige que la atmósfera que se encuentra sobre la vegetación se renueve completamente unas 25/30 veces por día (Mattei, 1973). Por lo tanto, para el crecimiento de la masa vegetal es necesario el recambio de aire, que se produce por las características turbulencias del mismo.

El incremento de la intensidad de la advección horizontal después de cierto límite, puede provocar efectos negativos o perjudiciales sobre manifestaciones de crecimiento en cultivo como maíz o girasol. Las cifras del Cuadro XV. 4 (Withehead y Luti, 1962) señalan una paulatina disminución del peso total de las plantas, y del área foliar, mientras que aumentan el grosor de las hojas, la relación de peso entre raíces y parte aérea, y el número de estomas por unidad de superficie.

**Cuadro XV. 4 Efecto de la velocidad del viento sobre el crecimiento (Withehead y Luti, 1962)**

Cultivo	Velocidad	
	1,6 km/h	52 km/h
Girasol		
Peso de una planta (g)	250	70
Relación peso raíces/ parte aérea	3,5	6,5
Área foliar por planta (cm <sup>2</sup> )	300	30
Traspiración (mg/h.cm)	33	27

## Maíz

Número de estomas /cm <sup>2</sup>	77	110
Peso seco /planta (g)	0,85	0,49
Relación raíz/aérea	1,07	1,23
Área foliar/planta (cm <sup>2</sup> )	14,61	7,58
Traspiración (mg/h.cm)	6	2,2

Se demuestra así, como a pesar del aumento de la cantidad de estomas por unidad de superficie, la mayor velocidad de viento incrementa el carácter xerofítico, con disminución de la traspiración, probablemente a causa del cierre estomático.

Los efectos de la advección horizontal del aire, cuando no adquieren demasiada intensidad, se manifiestan también como favorables en otros aspectos de la vegetación. Así, por ejemplo, constituyen un valioso factor para la disipación del vapor de agua de traspiración, cuya acumulación sobre las hojas por saturación del aire adyacente, provocaría una disminución del proceso. Igualmente, bajo condiciones de fuerte insolación, el movimiento que produce en las ramitas y hojas, evita el sobrecalentamiento, y ayuda también al intercambio gaseoso.

La acción del viento sobre los procesos de crecimiento vegetal es compleja y está relacionada con su influencia en la pérdida de agua desde la superficie por evaporación o evapotraspiración que, excluyendo las características físicas y/o biológicas de la superficie, depende principalmente de su velocidad, temperatura y contenido de vapor.

Cuando sobre la superficie activa se desplaza aire más caliente y seco, habrá cesión de calor utilizable en la evaporación por el “efecto oasis” (Glaser *et al*, 1957) que puede llegar a ser muy importante en climas áridos y expresarse, hasta varios kilómetros de distancia a sotavento, cuando se igualen los perfiles térmicos e higrométricos. Esta energía extra aportada por el viento puede proveer hasta el 60% de la energía usada en la evapotranspiración. En realidad, el efecto advectivo comprende dos acciones conjuntas: el “efecto oasis” y el “efecto tendadero” (Tanner, 1957). Este último se refiere al arrastre o disipación horizontal del vapor de evaporación por el aire circulando sobre la superficie activa. Es un efecto de “borde” que se anula a sotavento, hasta 40 veces la altura del cultivo (Raney, 1959).

Ambos efectos se suman en un “efecto advectivo total”, difícil de cuantificar en forma separada del intercambio de energía local.

En un día de verano la superficie puede incorporar al aire entre 50 y 80 m<sup>3</sup> de vapor de agua por hectárea. Este vapor necesita ser disipado o difundido rápidamente para que el proceso evaporativo continúe. Hay una “difusión molecular”, propia de la menor densidad del vapor acuoso con relación a la del aire, pero principalmente se debe a la “difusión turbulenta”, cuya mayor intensidad se relaciona con la velocidad y grado de turbulencia del viento.

Es obvio, que la velocidad de disipación vertical del vapor y el gradiente o “hidrolapso” resultante regularán la intensidad de evapotraspiración y, de esta manera, regularán la capacidad del vegetal para incrementar sus tejidos.

Bajo determinadas circunstancias, ambos elementos, el viento y la humedad del aire, pueden representar efectos negativos, determinando situaciones perjudiciales, que en última instancia afectará los rendimientos de los cultivos, constituyendo así

adversidades meteorológicas agrícolas. El viento, que facilita la dispersión del polen y la acción de insectos polinizadores, y disminuye la intensidad de heladas, también contribuye a la difusión de los esporos de enfermedades criptogámicas, de semillas de malezas, de insectos y otras plagas.

En otros aspectos agrícolas, interfiere por su velocidad en los tratamientos fitosanitarios, aéreos y terrestres, produce roturas, caídas de frutos, encamado y desgrane de cereales, erosión, etc.

Los valores excesivos de humedad del aire, además de reducir la evapotranspiración, se presentan con efectos adversos en problemas de cosechas de granos y frutos, impidiendo su desecamiento y maduración normales, en problemas de aparición y difusión de enfermedades criptogámicas ( período de hoja mojada), etc.

## 16. ÍNDICES BIOMETEOROLÓGICOS Y AGROCLIMÁTICOS

Antonio J. Pascale y Edmundo A. Damario

### 16.1 Expresión y cuantificación numérica de la relación tiempo/cultivo.

Los resultados obtenidos a partir de cualquier método de investigación biometeorológica, necesitan ser expresados en una forma que facilite su aplicación a todas situaciones y lugares. La única manera de resolver esta cuestión, es que los resultados se informen mediante valores numéricos posibles de reproducir o computar en cualquier lugar del que se dispongan observaciones meteorológicas.

A todos aquellos valores numéricos, simples o complejos, que sirven para cuantificar algún tipo de relación entre elementos del complejo meteorológico con los diversos procesos y componentes de la producción agropecuaria, se los conoce con la denominación de "*Índices*".

Según el tipo de relación con el proceso de referencia que miden, o los tiempos considerados, se los clasifica en *Índices Biometeorológicos*, *Índices Tecnometeorológicos* e *Índices Agroclimáticos*.

Un "*Índice Biometeorológico*" es la expresión cuantitativa de la relación que mantienen el crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos agrícolas y los ganados (incluyendo sus plagas y enfermedades) con las condiciones meteorológicas ambientales.

Para determinar la forma y magnitud de esa relación de dependencia es necesario disponer de observaciones biológicas (fenológicas y fenométricas) y físicas (sobre disponibilidades calóricas, hídricas, lumínicas, etc.) simultáneas y concurrentes.

Algunos de estos *Índices Biometeorológicos* son valores puntuales simples, de aquellos meteoros que operan como umbrales para el comienzo de alguna fase o como límites críticos de tolerancia. Tal por ejemplo: temperatura de brotación de frutales criófilos en primavera, fotoperíodo crítico para la expresión del desarrollo en los distintos grupos de maduración en soja, evapotranspiración relativa mínima para comenzar el crecimiento de cultivos estivales, temperatura mínima letal según el estado fásico, condiciones meteorológicas y aparición de plagas y enfermedades, etc.

En cambio, otros se expresan por la acumulación de sus efectos diarios durante el tiempo que demande el o los subperíodos. Por ejemplo: la acción biometeorológica de las distintas formas de la temperatura diaria, valoradas no por su magnitud puntual, sino por su efecto acumulativo como "suma de temperaturas", cantidad de "horas de frío" durante el descanso de frutales criófilos, acción combinada de suma de temperaturas y fotoperíodo en cereales invernales, etc.

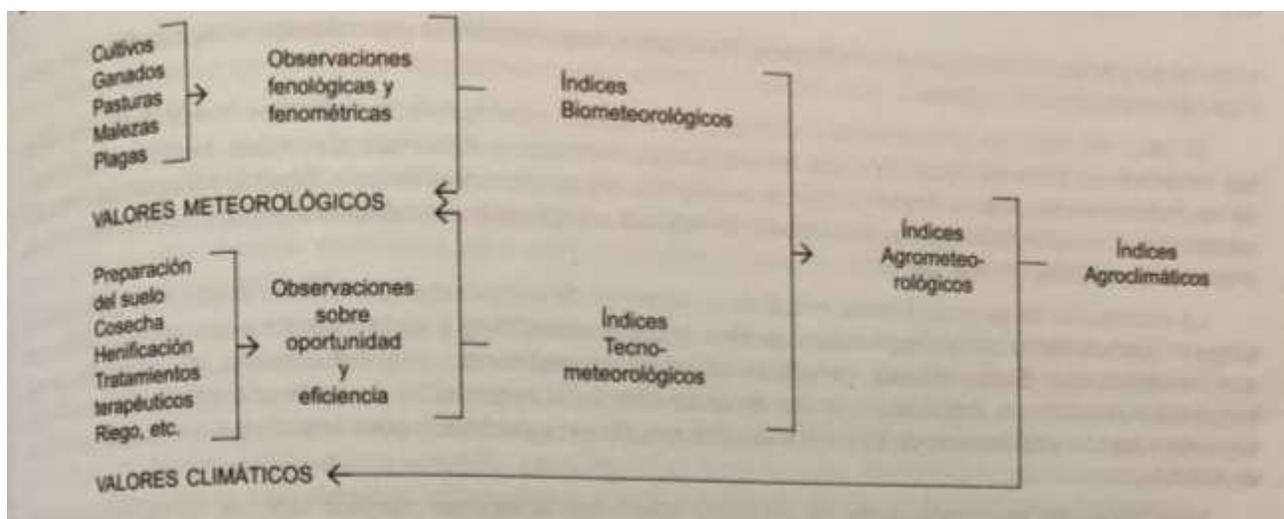
La producción final de los cultivos está condicionada no solamente por la satisfacción adecuada de sus exigencias biometeorológicas, sino también por la posibilidad de que la condición meteorológica permita la ejecución de todas las operaciones y técnicas indispensables para alcanzar el resultado final. Aquellos valores que en forma cuantificada, permiten establecer la influencia de las condiciones meteorológicas sobre las operaciones y técnicas de la producción agropecuaria, se pueden denominar *Índices Tecnometeorológicos*.

Como ejemplos, se pueden citar: condición de humedad de suelo en el empleo de maquinaria agrícola (Danh y Wingate-Hill, 1978; Dyer y Baier, 1979; Ghassan y Broughton, 1975), velocidad del viento en los tratamientos fitosanitarios (Schultz y

Akesson, 1955; Bourke, 1959; Jen Yu Wang, 1963; OMM-CMAg, 1960), humedad del aire en el proceso de desecamiento y cosecha de granos (Prosterov, 1962), condiciones meteorológicas y aparición y virulencia de plagas y enfermedades (Bourke, 1962; Craigic, 1945; Crawford, 1962), etc.

En conjunto, los Índices Biometeorológicos y los Tecnometeorológicos, forman los *Índices Agrometeorológicos*, es decir, "expresiones cuantitativas de la dependencia que tiene el ciclo y rendimiento de los cultivos, la virulencia de sus plagas y enfermedades, así como la eficiencia de operaciones culturales para producirlos, con las condiciones meteorológicas actuantes".

Cuando estos Índices Agrometeorológicos se relacionan con la información climatológica, se transforman en *Índices Agroclimáticos*, es decir, "la expresión cuantitativa para la valoración local, regional o territorial de las disponibilidades y variabilidad climática de los índices agrometeorológicos".



### Índices térmicos simples

La información contenida en las estadísticas climatológicas publicadas es la primera fuente de datos utilizada por los estudios agroclimáticos destinados a investigar las aptitudes agrícolas.

La agricultura es una empresa a largo plazo de carácter permanente y no circunstancial, cuyo resultado económico depende de las ganancias y pérdidas posibles de ocurrir en el curso de muchos años. Los riesgos atribuibles a adversidades meteorológicas están presentes en casi todas las regiones agrícolas del mundo, interesando entonces, precisar la frecuencia de tales adversidades con el fin de estimar el resultado económico final en función de sus probabilidades de ocurrencia. De allí la importancia de estudios enfocados a relevar parámetros estadísticos de la variabilidad del régimen de los principales elementos meteorológicos y principalmente de la temperatura del aire.

Si bien todas las formas de expresión del régimen térmico local, regional o territorial son usadas para determinar aptitudes agroclimáticas generales o especiales, ciertas presentaciones ofrecen más directa aplicación a problemas agrícolas y pueden ser consideradas como índices térmicos simples, los que no son comúnmente informados en las estadísticas climatológicas corrientes:

### **Variabilidad de la temperatura media mensual**

Las series de 30 o más años consecutivos de temperaturas medias diarias son el material adecuado para calcular la variabilidad interanual de este índice simple.

Por fortuna, casi todas las diversas expresiones de la temperatura del aire manifiestan distribuciones cuasi normales, por lo que la magnitud de la variabilidad puede ser calculada con el uso de la desviación típica o normal.

Como regla general, los climas marítimos registran pequeña variabilidad interanual, especialmente en los meses de la termofase positiva; lo opuesto sucede en los climas continentales. Por ejemplo, mientras que en la Argentina, las desviaciones típicas no superan los +2,5 °C, en el Hemisferio Norte no son raras desviaciones del orden de los +5 a +7 °C.

### **Intensidad y variabilidad de las temperaturas extremas**

Una de las condiciones para definir las características de las termofases anuales es la intensidad que pueden alcanzar los valores térmicos extremos, de cuyo conocimiento se logra inferir la posibilidad de los cultivos según sus tolerancias específicas o varietales, especialmente con relación a las condiciones extremas del verano y del invierno.

El valor del máximo enfriamiento invernal o del máximo calentamiento estival se indica en las estadísticas climatológicas por las temperaturas mínimas o máximas absolutas, también designadas como mínima minimorum y máxima maximorum para el período considerado. Agroclimáticamente tiene un valor relativo, especialmente en aquellos regímenes climáticos signados por condiciones de elevada variabilidad interanual.

La estimación de la probabilidad anual de ocurrencia de temperaturas mínimas o máximas perjudiciales exige el conocimiento de la temperatura mínima anual media (TAm) y de la máxima anual media (TAM) y de sus variabilidades. Estos valores climáticos se calculan realizando, respectivamente, el promedio de las temperaturas máximas absolutas y de las mínimas absolutas registradas en cada año de una serie suficientemente extensa y la desviación típica o estándar resulta un estadístico conveniente para medir su grado de variabilidad.

Para completar adecuadamente los aspectos referentes al régimen térmico regional, es recomendable la presentación cartográfica de estos valores. En el Atlas Agroclimático de la Argentina (Murphy et. al. 2009) incluyen 34 cartas agroclimáticas correspondientes a temperaturas medias mensuales, máximas y mínimas medias mensuales, temperaturas extremas y probabilidades de ocurrencia de distintos niveles térmicos.

### **Índices biometeorológicos de necesidad calórica**

La cantidad de energía finalmente disponible para el vegetal como resultado del balance de intercambio que hace con el exterior, es de muy difícil medición. La temperatura del aire ha pasado a usarse como una medida aceptable de la disponibilidad calórica ambiental y, por este motivo, el cumplimiento o la intensidad de muchas de las funciones vitales del organismo vegetal se expresan por su relación con las temperaturas actuantes. Hace más de doscientos setenta años se cuantifica la influencia de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de los vegetales, cuando de Réaumur en 1735 expresó la idea de que el calor tiene una acción aditiva en el desarrollo de las plantas, al decir que para cumplir su ciclo cada especie requiere que la sumatoria de las temperaturas medias

diarias alcance a totalizar una cantidad definida. A esta manera de contabilizar la acumulación energética se la conoce como «método directo de suma de temperaturas».

Cien años más tarde Boussingault supuso que la suma de temperaturas acumuladas por los cultivos anuales durante su ciclo era una exigencia invariable cualquiera fuera el lugar de siembra, y desarrolló la idea de la constante térmica», diciendo: «La duración de la vegetación parece estar en razón inversa de la temperatura media, de modo que si se la multiplica por el número de días durante los cuales una planta vegeta en climas distintos, se obtienen números más o menos iguales».

El error de ese concepto es considerar que todas las temperaturas sobre 0°C tenían un efecto favorable ignorando que por debajo de una cierta temperatura la planta no vegeta y permanece estacionaria con el fin de corregir este error, Gasparin (1844) propuso, especialmente para los cereales, descontar a cada temperatura media diaria integrante de la suma, el valor de 6 °C como nivel térmico inicial de crecimiento y al total resultante lo denominaron «suma de temperaturas residuales». Esta modificación tampoco alcanzó el objetivo de explicar la relación entre la duración del ciclo de los cultivos y la acumulación térmica en diferentes lugares y años.

Algún progreso se logró cuando se consideró una temperatura inicial de crecimiento de cada especie distinta y propia, a la que se llamó «temperatura base (tb)», obteniéndose así las temperaturas efectivas o residuales, grados-día o unidades calóricas. Esta última denominación sería incorrecta si se tiene en cuenta que el calor es un término cuantitativo de la energía cinética que depende del calor específico y de la masa del cuerpo, mientras que temperatura es un término cualitativo indicador de un nivel de actividad molecular. Más recientemente, se ha generalizado denominar como «tiempo térmico» a la sumatoria de temperaturas residuales o efectivas.

A través del tiempo, se adoptaron diversas metodologías para tratar de explicar las diferencias en las sumas de grados-día obtenidas en diferentes lugares de cultivo o en distintos años para un mismo lugar. Así, se usaron diferentes tb para cada grupo de cultivos, de 4 a 6 °C para los invernales y de 10 y 15°C para los estivales, O se consideraron tb distintas para cada subperíodo, generalmente de valor creciente con el avance del proceso fenológico, etc.

La temperatura base es diferente a la temperatura que corresponde al cero de crecimiento mínimo, valor este posible determinar en laboratorio, mientras que la tb se obtiene por otro procedimiento. La determinación de la temperatura base para el cálculo de las necesidades calóricas totales o por subperiodos de un cultivo, requiere realizar experimentos a campo (ensayos geográficos y de siembras periódicas) que incluyan todos los complejos climáticos posibles, para lograr la incidencia de diferentes temperaturas a través de distintos años y épocas de siembra incorporando además la mayor cantidad de cultivares existentes.

A partir de las observaciones fenológicas recogidas en estos ensayos, existen varios métodos para la determinación de la temperatura base (tb), aunque hay dos que son los más comúnmente utilizados: el de menor coeficiente de variabilidad y el de intercepción de las equis o abscisas (Arnold, 1959).

Para aplicar el primero, es necesario computar, para cada fecha de siembra la suma de temperaturas residuales sobre varios niveles térmicos escalonados a partir de los 0 °C y calcular la desviación típica y el coeficiente de variación de cada nivel. Aquel nivel que muestre menor variabilidad en las sumas para todas las siembras, será a tb a utilizar.

Para obtener la tb, por el método de la intercepción de las equis, se utiliza un procedimiento gráfico consistente en puntear sobre un eje de coordenadas la velocidad de

desarrollo en ordenadas y las temperaturas medias en abscisas, ambas correspondientes a cada una de las épocas de un ensayo de siembras periódicas y, para mayor exactitud, como promedios de más de un año de experimentación. La velocidad de desarrollo es la inversa del número de días que dura el subperiodo considerado en cada época desiembrada, es decir,  $1/n$  indicaría la magnitud de desarrollo diario. Con el fin de obtener resultados fácilmente graficables se puede usar, según convenga:  $10/n$ ,  $100/n$  ó  $1.000/n$ . En la gráfica, la unión de los puntos de relación formará una línea recta o curva, cuya prolongación hasta cortar la abscisa señalará la  $t_b$  que corresponde a una velocidad o intensidad de desarrollo cero.

La temperatura media diaria no valora adecuadamente la disponibilidad energética ambiental, principalmente porque enmascara la amplitud térmica, es decir, la variación entre las temperaturas extremas del día.

En el caso de que la  $t_b$  sea igual a la temperatura media ( $t_m$ ), no habrá aporte de grados-día y, sin embargo, como la temperatura máxima ( $t_M$ ) sobrepasa el valor de la  $t_b$ , existirán horas del día durante las cuales el vegetal dispondrá de un efecto térmico favorable. El método propuesto por Lindsey y Newman (1956) para el cómputo de unidades calóricas horarias, considera estas situaciones y agrega estos aportes calóricos a la suma térmica directa ( $t-t_b$ ), tanto mayores cuanto más se acerque el valor de la temperatura base al de la media. Cuando ellos coincidan, se obtendrá la mayor diferencia en los grados-día computados por ambos métodos. La magnitud de la diferencia se va reduciendo hasta hacerse nula cuando la  $t_b$  coincida con el valor de las temperaturas máxima y mínima ( $t_m$ ) diarias.

La fórmula de cálculo de la suma térmica diaria por esta metodología está basada en la determinación de la superficie de un triángulo que simula la variación diaria de la temperatura, cuya base es el tiempo en horas en que la temperatura supera la  $t_b$  y su altura es la diferencia entre la  $t_M$  y la  $t_b$ , resultando la siguiente expresión:

$$\text{Grados-día} = 12 [(t_M - t_b)^2 / t_M - t_m]$$

En los métodos para el cómputo de los grados-día considerados hasta aquí, se tuvo en cuenta solamente una  $t_b$  inicial de acumulación energética, pero sería más correcto aplicar también una temperatura límite superior de crecimiento, indicadora del nivel térmico después del cual la temperatura deja de tener efecto favorable.

Un buen ejemplo es la metodología de Gilmore y Rogers (1958) (Fig. XVI. 1A) desarrollaron para computar la exigencia calórica de cultivos de maíz. El cálculo de las "unidades calóricas" (UC GR), se realiza mediante un sistema residual simple, Aunque corregido para descontar el efecto deprimente de la temperatura vaga e incorporar los posibles aportes calóricos diurnos de días con temperatura mínima por debajo de la  $t_b = 10^\circ\text{C}$ .

La expresión de cálculo de las UC GR es la siguiente:

$$\text{UC GR} = (t_M + t_m) / 2 - 10^\circ\text{C}$$

Pero manteniendo el valor de  $10^\circ\text{C}$  a todas las  $t_m < 10$  y el valor de  $30^\circ\text{C}$  a todas las  $t_M$  que superen este nivel.

Existe una gran cantidad de métodos de acumulación térmica que, sobre la base de los fundamentos hasta aquí expuestos, se han desarrollado para distintos cultivos,

subperiodos y/o regiones de diversas características climáticas.

Todos los métodos anteriores, suponen una acción rectilínea de la temperatura ya que cada grado reconoce un mismo efecto energético. Debe recordarse que los procesos de crecimiento y desarrollo adoptan, en general, formas curvilíneas, indicativas de que los diferentes rangos térmicos ejercen distinto grado de acción.

Este concepto fue considerado, en primera instancia, en dos métodos de cómputo de acumulación térmica: el “exponencial” y el “termofisiológico”.

teniendo en cuenta que el crecimiento y el desarrollo fásico de las plantas resultan de una serie de reacciones fisicoquímicas interna las que, según la ley de Van't Hoff y Arrhenius, duplican su velocidad por cada 10°C de aumento en la temperatura, Livingston y Livingston (1913) desarrollaron el método Exponencial, por el cual la temperatura medias diarias superiores a los 4,5°C, (considera como velocidad de relación igual a la unidad), se transforman en índices de velocidad según la fórmula:

$$IE = 2^{(t^{\circ}C - 4,5)/10}$$

Tres años más tarde, Livingston (1916) propuso una modificación, para corregir el error que se cometía al suponer que la temperatura tiene una acción favorable sin límites. Basándose en las experiencias de Lehenbauer (1914), sobre el crecimiento horario de plántulas de maíz, en centésimos de mm, sometidas en oscuridad durante 12 horas a diferentes temperaturas, Livingston desarrolló el método Termofisiológico, mediante el cual se transforman las temperaturas medias diarias en índices dividiendo la velocidad de crecimiento del maíz a diferentes temperaturas por 0,9 centésimo de milímetro, valor del crecimiento horario mínimo a 4,5 °C.

Por ejemplo, el crecimiento medido de plantitas a 32 °C es de 0,111 mm; el Índice Termofisiológico es  $11/0,9 = 123$ . Lo que equivale a decir que a 32°C la velocidad de crecimiento es 123 veces la de 4,5 y este es el valor de máxima acción favorable. A partir de ahí, los valores de índices comienzan a disminuir hasta hacerse cero para la temperatura de 48 °C.

Como la graduación de los índices se desarrolló para maíz, el método no sería directamente aplicable a otros cultivos termófilos y, menos aún, a cultivos invernales. Tal vez, éste sea uno de los principales motivos de su reducida utilización en estudios biometeorológicos.

En años más recientes, entre los muchos métodos desarrollados sobre la acción de la temperatura en el desarrollo, se puede mencionar las Unidades Calóricas Diarias (UC B) de Brown, (1969), para explicar el comportamiento fenológico de maíces híbridos. El método considera en forma independiente y con distintas funciones (Fig XVI.1.B) a la contribución energética de los períodos diurno y nocturno, cuyo promedio constituye las unidades calóricas para el desarrollo.

La contribución diurna (en grados Fahrenheit) responde a una acción curvilínea determinada por la siguiente expresión:

$$YM = 1,83 (tM - 50^{\circ}F) - 0,026 (tM - 50^{\circ}F)^2$$

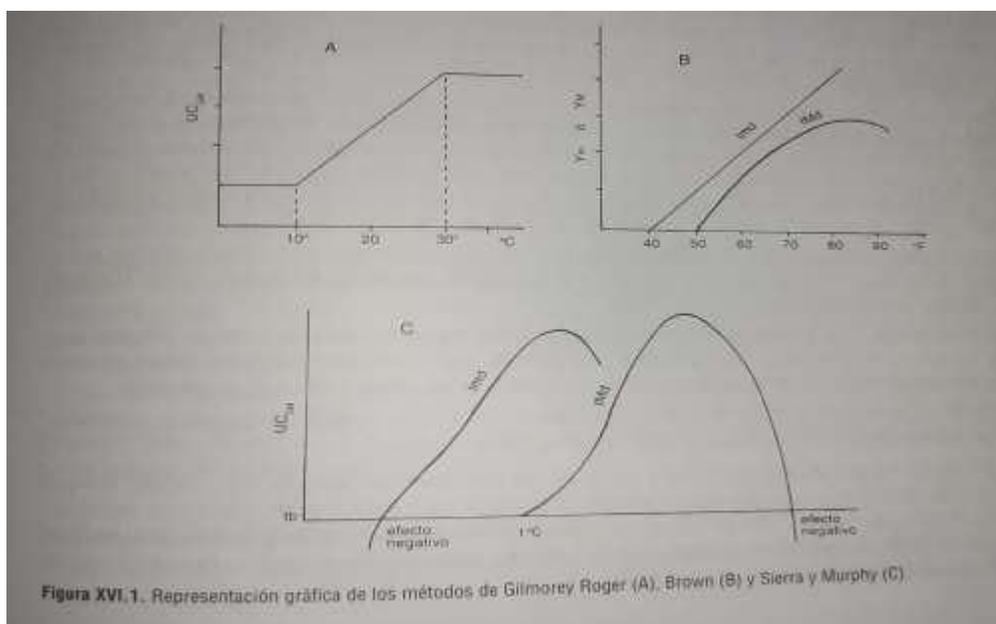
mientras que el efecto de las temperaturas nocturnas continúa siendo rectilíneo:

$$Y_m = t_m - 40 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Las Unidades calóricas diarias son entonces:

$$U_{cd} = (Y_M + Y_m) / 2$$

En el método Simur desarrollado por Sierra y Murphy (1974) para sorgo granífero, se adjudica acción curvilínea a ambas temperaturas, máxima y mínima diarias (Fig. XVI. 1. C), las que actúan en forma positiva por acumulación, desde un valor térmico mínimo, pasan por un óptimo y terminan en una máxima extrema. Cuando las temperaturas, tanto diurnas como nocturnas, son inferiores o superiores a sus niveles mínimo y máximo respectivos, no contribuyen al desarrollo sino que restan de la acumulación precedente.



A pesar de que los diversos métodos de cómputo sobre la acción de la temperatura sobre el crecimiento y el desarrollo de los cultivos agrícolas se usan universalmente, es necesario exponer algunas aclaraciones relacionadas con la utilización de sumas de temperaturas como expresión de las exigencias calóricas de los cultivos.

Desde un punto de vista estrictamente biológico se podría señalar:

1. El balance calórico vegetal está condicionado por una serie de factores externos e internos y no siempre la temperatura del aire se correlaciona totalmente con sus resultados, ni tampoco es un indicador absoluto de la carga calórica del ambiente. En las distintas horas del día, la temperatura de los tejidos vegetales es diferente a la temperatura del aire (Gates, 1964; Linacre, 1964). Además, en ciertos casos, la temperatura del suelo puede tener influencia en el desarrollo de ciertos cultivos anuales (Wang, 1958; Davitaya, 1965; Aung et al, 1968) o de algunos perennes (Benacchio y Blair, 1972). Cuando puede estimarse la carga calórica radiativa sobre la superficie de los vegetales, los resultados derivan en índices biometeorológicos más representativos (Newman et al, 1967).

2. No solamente la temperatura del aire determina el desarrollo, debiéndose considerar la acción de otros elementos y, especialmente, la del fotoperiodo. Para la gran mayoría de los cultivos, calor y duración del día son dos elementos estrechamente relacionados y en gran medida interactuantes.

El atraso en la fecha de siembra de los cultivos anuales estivales, disminuye sensiblemente la cantidad de grados-día necesarios para su desarrollo, porque los fotoperíodos más cortos, que actúan sobre los tejidos verdes, inducen a las plantas a desarrollar más rápidamente, produciéndose la floración sobre plantas de crecimiento decreciente acorde a la demora de implantación. En cultivos anuales invernales, que necesitan satisfacer su dosis de enfriamiento, el atraso en la época de siembra acelera el desarrollo hasta un límite a partir del cual, aumenta la suma de temperaturas efectivas para completarlo y, con siembras extremas de primavera, continúa un crecimiento indefinido a pesar de la incidencia de temperaturas y fotoperíodos favorables. Otras condiciones meteorológicas, como nubosidad, humedad de suelo y aire, lluvias, etc., pueden modificar las acumulaciones de temperaturas efectivas, alterando la supuesta constancia en la relación entre índices bioclimáticos y los rendimientos (Wang, 1963; Benoit et al, 1968; Kish et al, 1972).

En algunos cultivos, como el maíz, el maní, la arveja, etc., las sumas de temperaturas efectivas presentan un valor casi constante para cada cultivar, porque la temperatura es el principal factor biometeorológico su desarrollo. Sin embargo, esa no es la regla general, pues es común observar variaciones anuales en las sumatorias para cultivos sembrados en igual época en diferentes lugares o en distintos años (Castillo y Giménez Ortiz, 1966; Aspiazu, 1971) o con diferentes épocas de siembra en un mismo lugar y año (Mota y Goedert, 1969), o en especies perennes en distintos años (Rom y Arrington, 1966).

Algunos cultivos responden en distinta forma a la temperatura a lo largo de su ciclo evolutivo, por lo cual igual acumulación térmica total puede producir efectos diferentes en el rendimiento, como lo señala Wang, (1960) para el cultivo comercial de arveja.

En cultivos sensibles al fotoperíodo, la suma de temperaturas efectivas sólo debe ser utilizada para realizar comparaciones entre iguales variedades o cultivares sembrados en

iguales latitudes y considerando solamente rangos de temperaturas comunes en sus lugares y épocas de cultivo normales.

3. Con respecto a la acción de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo vegetal pueden mencionarse algunos aspectos vinculados al tema de las sumas térmicas:

a. En algunas especies el crecimiento y desarrollo se conjugan íntimamente. Por ejemplo, siempre que las condiciones externas sean normales, la floración del tomate comienza después de formarse el 13° nudo mientras que en híbridos de maíz y girasol la floración se expresa recién cuando se ha producido un determinado número de hojas. Parecería que las especies indiferentes al fotoperíodo la floración depende mucho del crecimiento.

b. La relación fotosíntesis-respiración establece la importancia creciente del termoperiodismo en los vegetales. Las reacciones que limitan el crecimiento durante el día, son diferentes y tienen distinta característica que aquellas de la noche. Algo similar podría suceder en el desarrollo por la acción termoperiódica. En muchas plantas de climas templados la variación de la amplitud diaria de la temperatura es una exigencia común. En estas plantas, las temperaturas óptimas diurnas para el crecimiento son más altas que las nocturnas y aumentan a medida que la planta progresa hacia la reproducción. En cambio, en las plantas termófilas tropicales y subtropicales el crecimiento responde a las temperaturas constantes o de escasa variación diaria y disminuyen hacia la floración.

c. Probablemente, otro aspecto importante de la respuesta termoperiódica sea el de mantener una relación favorable entre la producción fotosintética y la pérdida por respiración cuya intensidad, a diferencia de la fotosíntesis, aumenta en forma creciente con el aumento de la temperatura. En muchas especies de cultivo, las altas temperaturas nocturnas conspiran contra la obtención de buenos rendimientos.

Estos y otros aspectos indican las dificultades de sintetizar adecuadamente los procesos de crecimiento y desarrollo a través de las sumas de temperaturas o, por lo menos, alertan sobre su utilización indiscriminada.

### Índices agroclimáticos de sumas de temperatura

En los estudios de carácter agroclimático, destinados a evaluar las aptitudes locales o regionales para la producción de cultivos agrícolas con necesidades calóricas conocidas, es imprescindible el conocimiento de las temperaturas efectivas o residuales normales mensuales. El cómputo directo de tales valores normales a partir de registros meteorológicos de muchos años es demasiado largo y trabajoso. Esta es la razón por la cual los promedios climáticos mensuales de temperaturas efectivas ( $\Sigma TE$ ), se obtienen corrientemente a partir de las respectivas temperaturas normales mensuales, descontando a las mismas la temperatura base y multiplicando el residuo por el número de días del mes.

Este procedimiento, llamado directo, ignora dos aspectos que significan otras tantas fuentes de error en los resultados. Uno de ellos es que la temperatura media mensual climática no expresa la variabilidad diaria, cometándose un error tanto más grande cuanto mayor es la misma. Tampoco considera la repercusión de la amplitud térmica diaria en la variabilidad interanual de los promedios mensuales y, menos aún, sobre la variabilidad mensual de los valores térmicos extremos (Damario y Pascale, 1971).

En la mayor parte de los casos, la suma de temperaturas efectivas obtenidas a partir de los promedios mensuales climáticos, resulta menor que la obtenida computándola para

cada uno de los días que integran el universo utilizado para obtener tales promedios térmicos.

La acumulación mensual media de unidades calóricas dependerá de la frecuencia normal con que se presenten días con temperaturas extremas diferentes y también, en cierta medida, de la variación de la amplitud térmica diaria. De acuerdo con esto, la aproximación de valores agroclimáticos mensuales de unidades calóricas requiere conocer, imprescindiblemente, la cantidad media o frecuencia de días que, dentro de cadames, puedan registrar temperaturas máximas y/o mínimas de diferente magnitud.

La metodología desarrollada para efectuar las estimaciones de acumulación térmica superando las limitaciones señaladas puede ser consultada en detalle en Bioclimatología Agrícola y Agroclimatología de Pascale y Damario (2004), así como en el Atlas Agroclimático de la Argentina (Murphy et al, (2008) puede hallarse la cartografía correspondiente.

### Índices biometeorológicos de exigencia en frío

La cuantificación de la necesidad fisiológica de pasar una etapa de su ciclo bajo condiciones externas de bajas temperaturas, que tiene un gran grupo de cultivos agrícolas, ha recibido expresión diferenciada en los estudios biometeorológicos. En las especies herbáceas anuales, que manifiestan esa necesidad durante una etapa vegetativa, se habla de «necesidad o exigencia en vernalización», Para estos casos, el índice biometeorológico se expresa por el tiempo o la cantidad de días durante las cuales se deben mantener las bajas temperaturas para obtener la satisfacción plena de esa necesidad.

Estas condiciones son variables para cada especie y, dentro de cada una, según las exigencias de los diferentes cultivares. Por ejemplo, para los diferentes tipos bioclimáticos de trigos cultivados en Rusia

Cuadro XVI.1. Tratamiento de vernalización según tipo de trigos (Lysenko, 1928).

Trigos	Temperatura de vernalización °C	Duración en días
Otoñales	0 a 2	40
Semioñoales	3 a 5	25
Primaverales	5 a 10	10

Para los trigos argentinos la satisfacción artificial de la necesidad en frío de los cultivares más exigentes se logró con 20-25 días a temperatura entre 1 a 7 °C (Pascale, 1969).

En los cultivos arbustivos o arbóreos plurianuales, los que presentan exigencia en frío son caducifolios durante el periodo anual de descanso, que es precisamente durante el cual deben satisfacer la dosis de enfriamiento que necesitan para poder «romper» la inactividad vegetativa invernal y cumplir adecuadamente la etapa vegetativa posterior.

En estas plantas «criófilas», la exigencia en bajas temperaturas, conocida como «exigencia en frío» o «exigencia en enfriamiento», se cuantifica por dos índices

Biometeorológicos: las <<Horas de Frío>> y las <<Unidades de Enfriamiento>>.

La valoración cuantitativa de la exigencia en frío de las plantas arbóreas comenzó realmente después de que Nightingale y Blake (1934) determinaron experimentalmente en laboratorio que ramitas de manzano y duraznero no crecían mantenidas a temperatura por debajo de los 7°C. Con posteridad, este valor térmico (7° o 7,2°C) fue usado como límite superior de las temperaturas con acción favorable de enfriamiento, designándose como <<hora de frío>>, o <<unidad de dormición>> , a cada hora en que la temperatura permanece 7°C o menos , totalizándose en la cantidad de <<horas de frío>>, acumuladas durante el periodo de descanso, para explicar las variaciones Fenológicas y productivas de las distintas especies criófilas de frutales, ornamentales y forestales.

Para los frutales, diversos investigadores establecieron una escala de cantidad de horas de frío que deberían acumular para prosperar y poder romper el descanso adecuadamente, desde las 900 a 1000 horas para manzano, 600 a 900 para duraznero y disminuyendo sucesivamente para otras especies como ciruelo, damasco, almendro, etc. (Chandler et al., 1937; Magness y Traub, 1941). Estos valores medios se usaron como exigencia durante muchos años hasta que las manifestaciones Fenológicas registradas en diferentes lugares geográficos y bajo diferentes climas, demostraron que esta escala no es estable ni absoluta, que no todas las temperaturas por debajo de los 7°C tienen el mismo poder enfriante, que las cercanas o por debajo de los 0°C no aportaban efecto positivo alguno, que la forma en que ocurren el descanso produce diferentes reacciones y que los cultivares de cada especie requieren dosis particulares de enfriamiento. Ese conocimiento hizo posible desarrollar las <<unidades de enfriamiento>> o <<unidades de frío>> (UF) que resultan de transformar cada temperatura media horaria en un valor relativo.

La escala de transformación propuesta por Richardson et al. (1974) (Cuadro XVI.2) y conocido como modelo Utah, asigna la mayor efectividad enfriante a las temperaturas horarias entre 2,5°C y 9,1°C, niega efecto a las inferiores 1,5°C y considera como devernalizantes, o anuladoras, a las mayores de 16°C. Esta escala se continúa usando a pesar de que estudios más recientes aconsejan introducir los efectos del nivel termoperiódico diario y el de las etapas de descanso cumplidas. (Erez et. al., 1987).

La sumatoria algebraica de los valores resultantes de transformar las 24 temperaturas horarias de un día proveerá las UF diarias, que podrán ser positivas o negativas y la suma algebraica de todas las UF de un mes producirá el respectivo valor mensual (UFm). Finalmente, el promedio climático UFC resulta de adicionar algebraicamente y promediar los valores UFm computados desde una serie suficiente de años.

**Cuadro XVI.2.** Escala de transformación de las temperaturas horarias en unidades de frío. (Richardson *et al.*, 1974).

Temperatura °C		UE
<	1,4	0
1,5 a	2,4	0,5
2,5 a	9,1	1,0
9,2 a	12,4	0,5
12,5 a	15,9	0
16,0 a	18,0	-0,5
>	18,0	-1,0

Los estudios Eres et.al. (1987) demostraron el efecto que tienen otros rangos de temperaturas sobre la duración del periodo de enfriamiento. Temperaturas moderadas de entre 13 y 17°C alargan el periodo de enfriamiento si ocurren en la parte final del descanso. De igual manera, altas temperaturas pueden producir una anulación parcial o total de enfriamiento antes conseguido. Este efecto devernalizante ocurrió en durazneros sometidos a exposiciones de duración variable con temperaturas de 24°C (Couvillon y Erez, 1985). Asimismo se demostró que interrumpiendo el periodo de enfriamiento acumulado. Teniendo en cuenta esas influencias de altas temperaturas, la de alternancia de altas y bajas temperaturas, y la acción favorable de los niveles térmicos positivamente enfriantes, se desarrolló otro esquema de cuantificación, al que se conoce como el << Modelo Dinámico >> (Erez et. Al., 1990). La utilización de este modelo requiere datos difíciles de obtener. Además, aplicaciones comparativas entre los métodos HF, Utah y Dinámico, arrojaron diferentes resultados en distintos lugares y especies. (Pitaco, 1990; Ontiveros et al, 1995) y en ciertos casos ninguno fue útil para explicar comportamientos fenológicos (Balandier et al. , 1990).

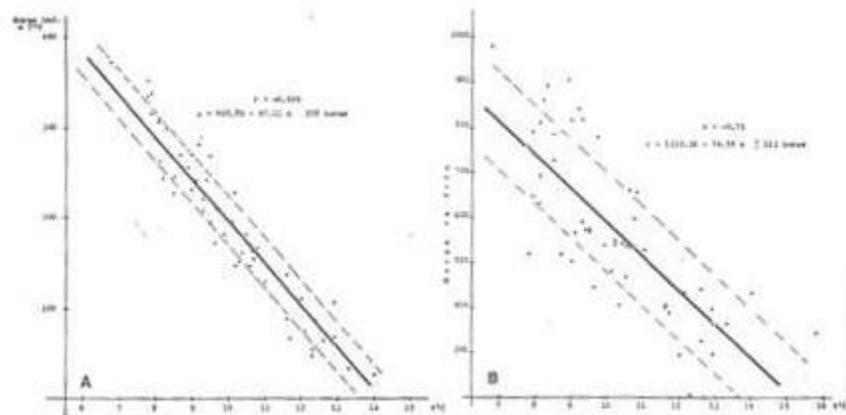
### Estimación agroclimática de la exigencia en frío.

La determinación agroclimática de los valores de Horas de Frío (HF) o de Unidades de Enfriamiento (UF) en forma directa, supone la disposición de valores térmicos horarios durante una cierta cantidad de años. La obtención de tales valores por observaciones directas es muy poco probable, por ello se recurre al cómputo usando registros termográficos, procedimiento que además de engorroso, puede aportar errores cuando las temperaturas horarias están ya computados o sistematizados. En este sentido la provisión de valores horarios por estaciones automáticas es todavía algo limitada.

Sin necesidad de recurrir a estas formas de observación, tanto las <<horas de frío>> como las <<unidades de enfriamiento>> pueden estimarse mediante simplificaciones basadas en la relación que estos índices biometeorológicos guardan con otras expresiones del régimen térmico, las cuales son de observación e información climática corriente.

Entre los valores medios de horas de frío acumuladas durante el invierno o durante el descanso invernal de los cultivos y las temperaturas media o mínima media climáticas del mes o los meses más fríos del año existen coeficientes de correlación significativos. Un ejemplo, entre muchos, se presenta en la Figura XVI.2 que señala la estrecha correlación

entre las HF y las temperaturas medias del mes de julio en Buenos Aires (Pascale y Aspiazu 1965).



**Figura XV.2.** Correlación entre las horas de frío y la temperatura del mes de julio en Buenos Aires (período 1911-1963); B. Correlación entre el número de horas de frío del periodo normal de descanso de los ciruelos en Buenos Aires -1° de Abril a 31 de Agosto.

Sobre esta base se desarrolló una amplia metodología de estimación de las HF por distintos procedimientos gráficos y analíticos de los valores diarios, mensuales y acumulados durante el periodo de descanso.

En la Argentina el primer intento de la estimación agroclimática de las HF mensuales (climáticas) fue el método gráfico de Damario (1969) confeccionando sobre la base de la información anterior a 1950 con varios valores de HF mensuales computados desde registros termográficos de 18 localidades del país y publicadas en varios estudios sobre el tema.

El análisis de estos valores derivó en la confección del gráfico de la Figura XVI. 3, el cual es adaptable a cualquier localidad de la que se conozcan los valores climáticos de temperatura mínima anual y las de los cinco meses más fríos cuyo promedio se adjudica al punto medio de la escala inferior, valorando a partir de este las distintas divisiones de la escala de medio en medio grado. Luego, para conocer las HF de un mes cualquiera entra con el valor de la temperatura mínima media, se sigue la ordenada hasta contar la curva de temperatura mínima anual y ordenadas se leen las HF.

En el gráfico se muestra el cálculo de un mes con temperatura mínima media de 6,3°C para una localidad con 7,8°C de temperatura mínima media de los 5 meses y una temperatura mínima media anual de 12,2°C.

Utilizando información actualizada, el mismo autor desarrolló en 2007 otro procedimiento gráfico para calcular las HF y las unidades de frío diarias (UE) considerando la temperatura mínima del día, la amplitud de 9 horas y con cinco niveles de amplitud (7, 9, 11, 13 y 15).

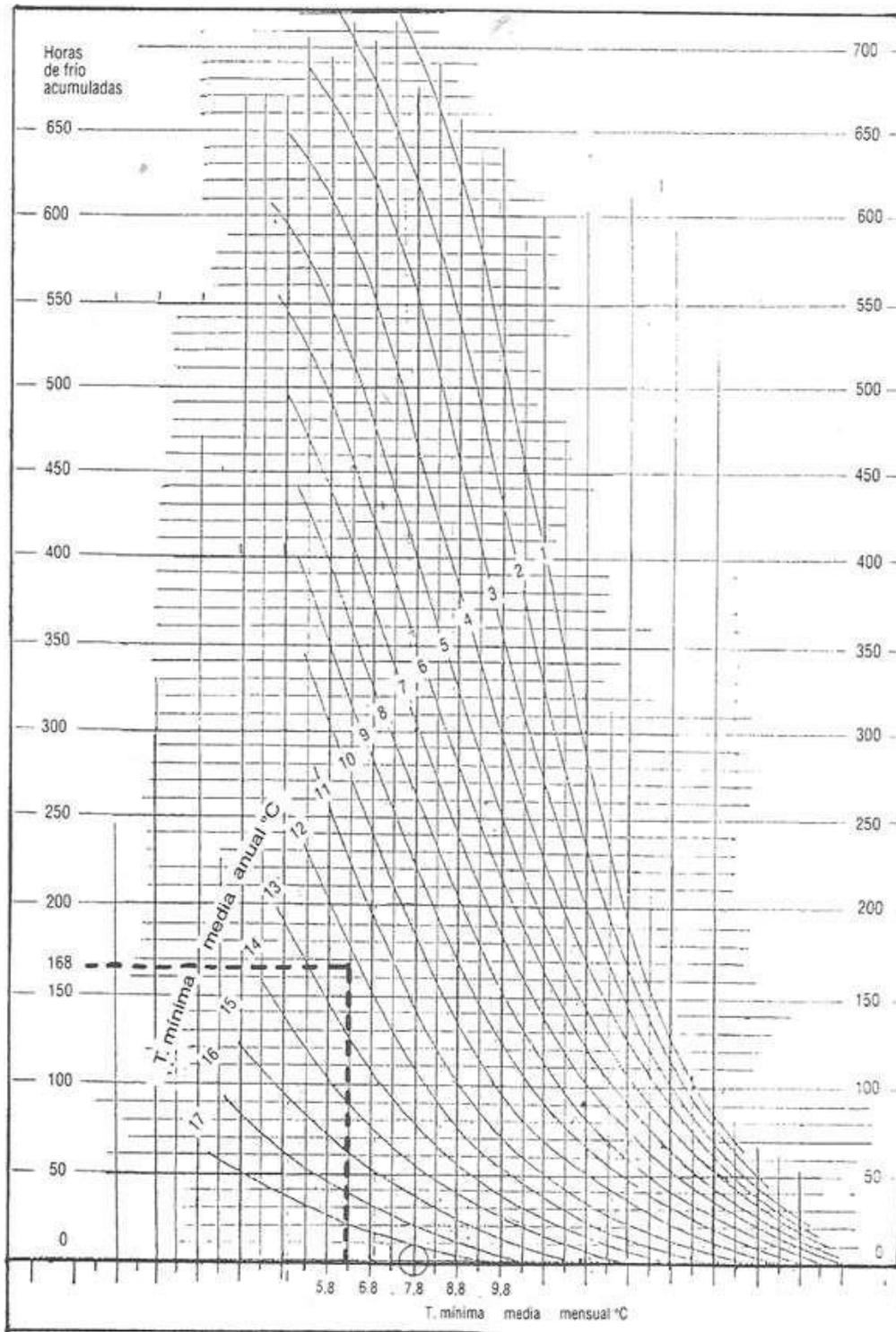
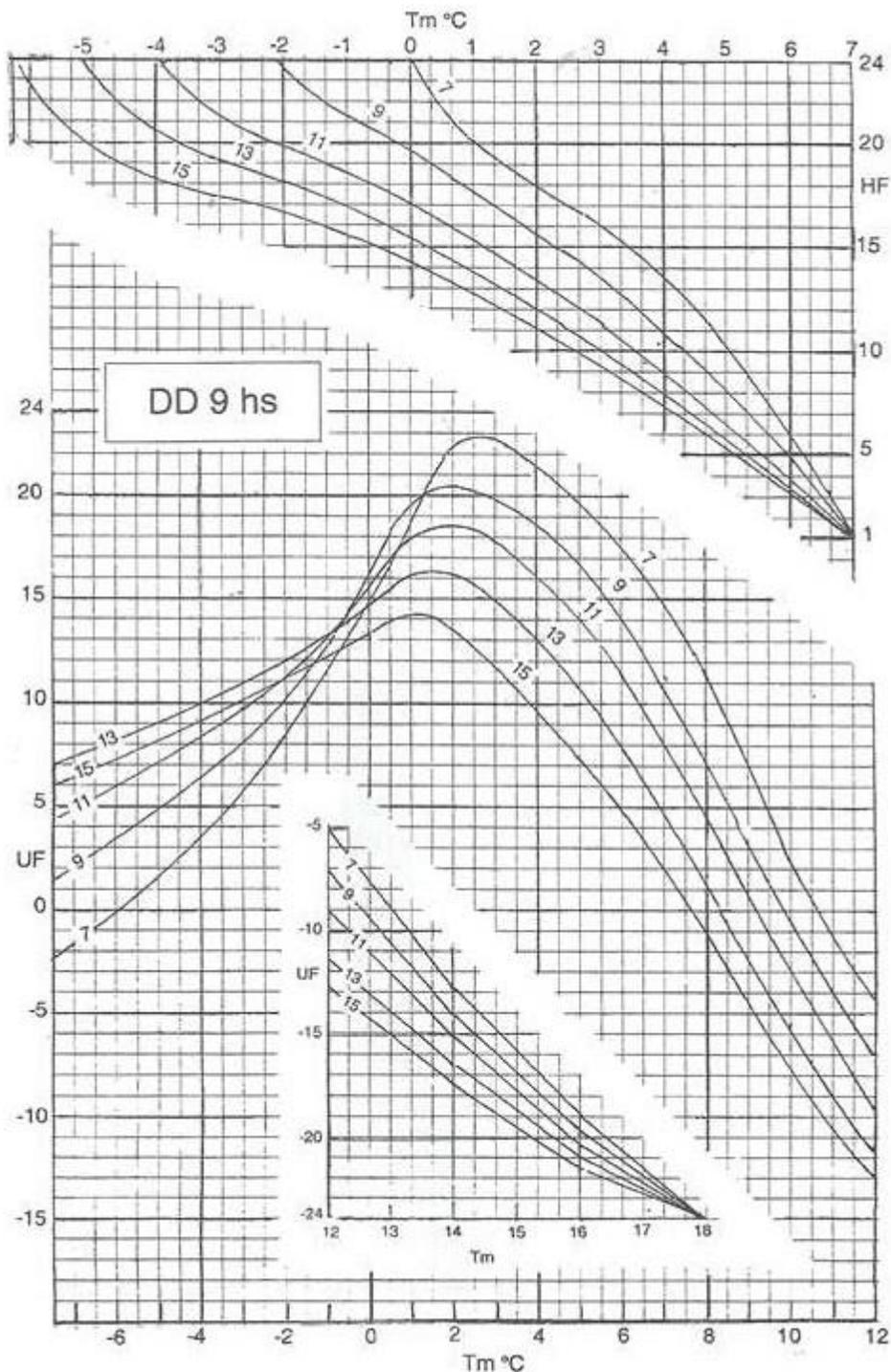


Figura XVI.3. Grafico para determinar las <<horas de frío mensuales>> (Climáticas).



**Figura XVI.4.** Horas de frío y unidades de frío diarias para una duración de día de 9 horas y cinco diferentes amplitudes térmicas.

En los estudios agroclimáticos sobre disponibilidad de enfriamiento invernal, el interés reside más en conocer la cantidad total de «horas de frío» acumulada normalmente

durante el año o durante el periodo de descanso vegetal, que en el conocimiento de los valores mensuales. Damario et al. (1998) desarrollaron un método para estimar las HF de los 5 meses (1/5 al 30/9) considerado como de descanso vegetativo en especies criófilas con dos fórmulas que incluyen las temperaturas mínimas medias mensuales y anuales (T12 y T4).

Una fórmula para estimar la acumulación de HF durante los cuatro meses (del 1° de mayo al 31 de agosto) en que se supone se cumple mayormente el descanso, fue desarrollada por Damario et al., 2008, utilizando como material informativo de valores térmicos medios mensuales y de horas de frío computadas diariamente con la fórmula de Parton y Logan (1981) para el período 1971-2000 para un centenar de localidades. El análisis de todo el material mediante correlaciones y regresiones múltiples entre las HF calculadas y los principales valores térmicos permitió reducir el análisis a los tres parámetros con mayor ajuste: la temperatura mínima media anual (T12), el promedio de las temperaturas mínimas de los 4 meses (T4) y la temperatura mínima media del mes de julio (Tj):

$$\begin{aligned} HF1000 &= 2.668,82 - 36,384 T12 - 58,556 T4 - 196,334 Tj + 2,461 T42 + 6,227 Tj^2 \\ HF2000 &= 2.456,867 - 66,866 T12 + 2,026 T12^2 - 40,276 T4 - 97,925 Tj \end{aligned}$$

La primera fórmula se aplica a cálculos de hasta 2000 HF, correspondiendo usar la segunda para recuentos mayores.

La compulsa entre las HF calculadas con estas fórmulas y las computadas por Parton y Logan acusó un error medio porcentual del 2,7%.

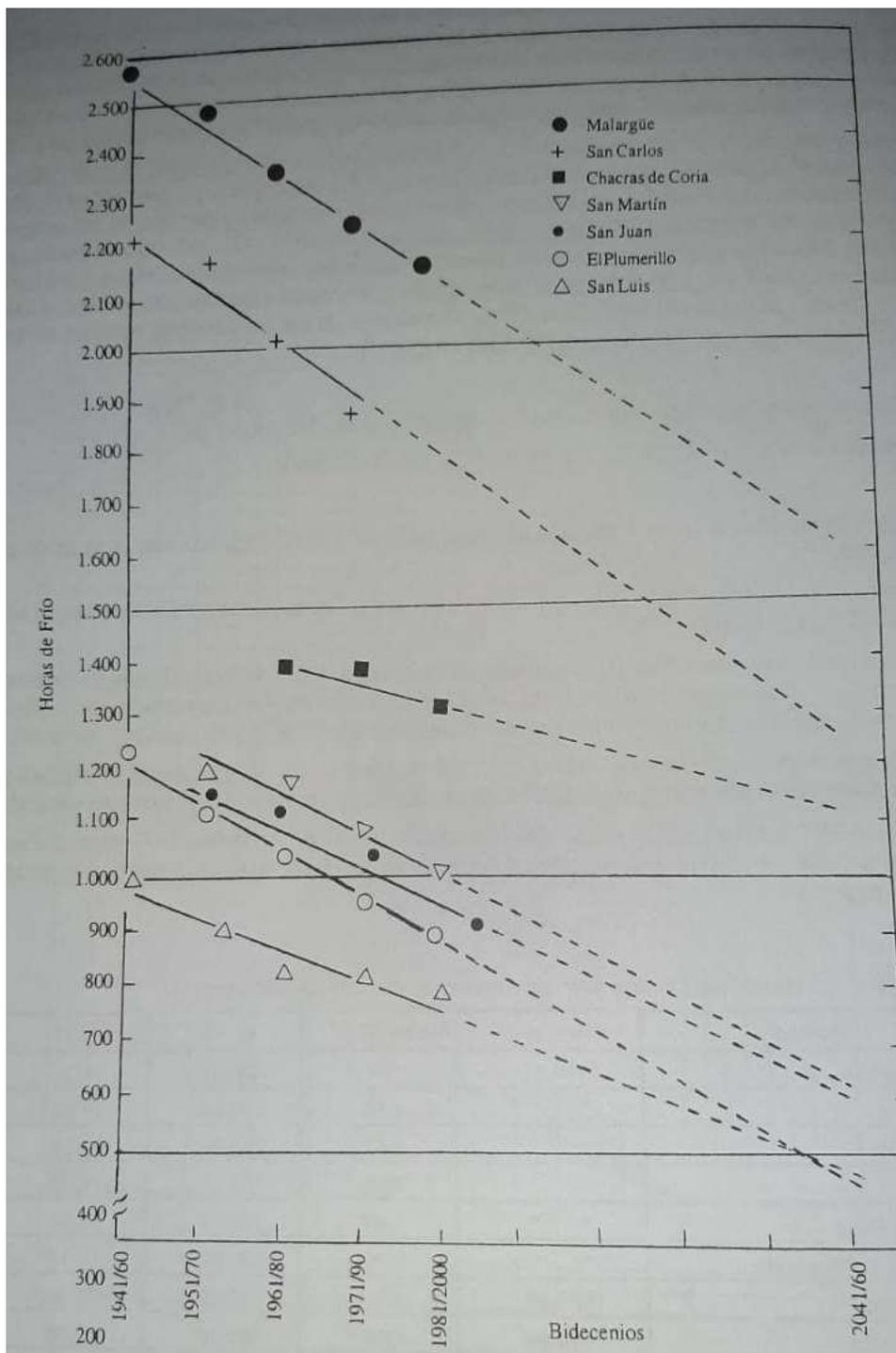
Las posibles diferencias en las HF calculadas por cualquiera de los métodos citados no repercutirá mayormente en la satisfacción de enfriamiento de las especies criófilas. Por otra parte, la variabilidad interanual de las temperaturas mínimas medias mensuales se traducirá en similar variación de las HF.

Así lo confirman los valores del Cuadro XVI.3 en el cual se informan los valores de HF medias de 5 meses de descanso vegetativo (mayo a septiembre), su desviación típica y el coeficiente de variación.

La Figura XVI. 5 reproduce las variaciones bidecenales de las HF en la Región Cuyana. De seguir confirmándose estas tendencias en los próximos decenios se manifestarán serias consecuencias para la fruticultura regional.

**Cuadro XVI.3.** Variabilidad de las HF acumuladas en promedio en el período de descanso vegetativo.

Localidad	Periodo	Media °C	$\sigma$ °C	CV °C
Resistencia	1976-85	227	77,58	34,21
Rosario	" "	619	117,54	18,98
Córdoba	" "	640	150,89	23,58
Ezeiza	" "	686	123,69	18,03
Mar del Plata	" "	846	123,77	14,63
Comodoro Rivadavia	" "	1386	251,72	18,17
San Pedro	1971-00	588,3	126,38	21,48
Rama Calda	1969-89	1337	151,44	11,33
Zumalao	1963-72	283	61,76	21,80
Concordia	1967-75	462	139,53	34,71



**Figura XVI.5.** Promedios bidecenales de HF de algunas localidades con información de la Región de Cuyo con al menos cuatro décadas consecutivas (Damario et al., 2007).

Además, no todas las HF obtenidas con estos métodos son de acción enfriante efectiva. La comparación entre horas de frío y unidades de enfriamiento computadas a partir de

temperaturas horarias medidas en varias localidades, permitió comprobar que en los meses con temperaturas medias mayores a 14 °C o máximas medias mayores de 21 °C, se producía el fenómeno de devernalización, es decir, de anulación de las HF calculadas.

### **Estimación agroclimática de las unidades de enfriamiento (UE)**

En los estudios agroclimáticos, importa conocer los valores climáticos mensuales de las «Unidades de Enfriamiento» (UE). Para su cómputo directo se necesita disponer de temperaturas horarias durante varios años, observadas directamente o computadas desde fajas termográficas. Esta información no es corriente o fácilmente asequible, por lo que se ha desarrollado un método para aproximar los valores medios mensuales de UE usando información disponible en las estadísticas climáticas, o de fácil obtención a partir de ella (Damario y Rodriguez, 1991). El método admite, con ciertos ajustes, cualquier modificación a la escala de transformación de Richardson y el uso en modelos combinados, como el de Erez et al. (1990)

La estimación de las UE medias mensuales, exige conocer los siguientes parámetros climáticos:

- a. cantidad o frecuencia media mensual de días con diferentes temperaturas mínimas (tmd).
- b. temperaturas horarias (th) de cada uno de esos días.

Sin embargo, ninguno de estos valores figura en las estadísticas climáticas comunes. La frecuencia de días con distintas temperaturas mínimas (tmd), se puede estimar de las cartas estacionales de desviación típica (Damario et al, 2011) de las HF y las temperaturas horarias con los métodos de Marc Hallaire (1950) o Linville (1990).

### **Índices agroclimáticos del régimen de heladas**

En todos los estudios destinados a ponderar la aptitud agrícola local o regional de acuerdo a las características agroclimáticas, la consideración del régimen de heladas ocupa un lugar preferente por su incidencia directa en las manifestaciones productivas de las mayores áreas agrícolas de latitudes medias.

Se entiende por régimen, la forma en que suceden u ocurren los fenómenos y la descripción del régimen agroclimático de heladas debe incluir todos los índices que expresen, no sólo su temporalidad, intensidad, frecuencia y variabilidad, sino también los que miden su posible repercusión sobre los componentes biológicos del proceso productivo agrícola.

En el caso de las heladas, los índices agroclimáticos usados para la caracterización de su régimen, como por ejemplo fechas de primeras y últimas heladas, temperaturas mínimas, duración, frecuencia de heladas, índices de peligrosidad, etc., se encuentran en el capítulo correspondiente a esta adversidad.

### **Índices bioclimáticos y agroclimáticos sobre necesidad hídrica**

Los índices de temperatura y de fotoperíodo son utilizados para calificar y cuantificar sus relaciones con el proceso biológico para el desarrollo de las plantas que a través de la

aparición sucesiva de las fases fenológicas, conducen al cumplimiento del ciclo vital de los cultivos. Si bien en ciertos casos, esos elementos bioclimáticos pueden actuar en la expresión del crecimiento de las plantas, el agua disponible en el suelo es el factor fundamental para generar el aumento de la masa vegetal producida en el proceso fotosintético. La contribución del agua edáfica en los subperíodos críticos de mayor actividad vegetativa es el principal factor bioclimático en el rendimiento cuantitativo.

Si bien las lluvias son el aporte natural de agua al suelo, más allá de su consideración en la valoración de los climas según su monto anual o estacional, no se las utiliza como índice bioclimático para expresar efectos, ya que la disponibilidad final de agua y la magnitud del aprovechamiento por la planta es un fenómeno no complejo, donde las condiciones físicas atmosféricas y edáficas regulan la cantidad y dirección del flujo de agua a través de la superficie activa de intercambio y, consecuentemente, la cantidad remanente de agua que permanece en el interior del suelo.

El conocimiento de la magnitud y de las variaciones que experimenta la humedad del suelo en tiempo y espacio, es un elemento muy importante en toda valoración agroclimática. Las dificultades técnicas involucradas en la medición directa y continuada del contenido de agua edáfica, han impedido disponer de series observacionales suficientemente extensas y generalizadas para efectuar con ellas una agroclimatología regional.

Los índices que expresan tanto las necesidades de agua como los referidos al balance hídrico del suelo se desarrollan en los capítulos correspondientes al ciclo del agua.

Cabe señalar que, tanto para las heladas como para la necesidad hídrica, Pascale y Damario (2004) han desarrollado métodos de estimación de los índices agroclimáticos respectivos, los cuales pueden consultarse con detalles en su obra original.

### **Índices bioclimáticos combinados de temperatura y fotoperíodo**

En los capítulos sobre la acción bioclimática de los elementos del clima para el cumplimiento del proceso fenológico, ha quedado definida la importancia para el desarrollo vegetal tanto de la temperatura como del fotoperíodo.

Para muchos cultivos la interacción de suma de temperatura y fotoperíodo parece la combinación adecuada para señalar la dependencia del proceso de desarrollo frente al complejo ambiental.

La exigencia bioclimática correspondiente se estudia con índices combinados, entre los cuales se indican a continuación algunos de los utilizados en experimentos conducidos en el país.

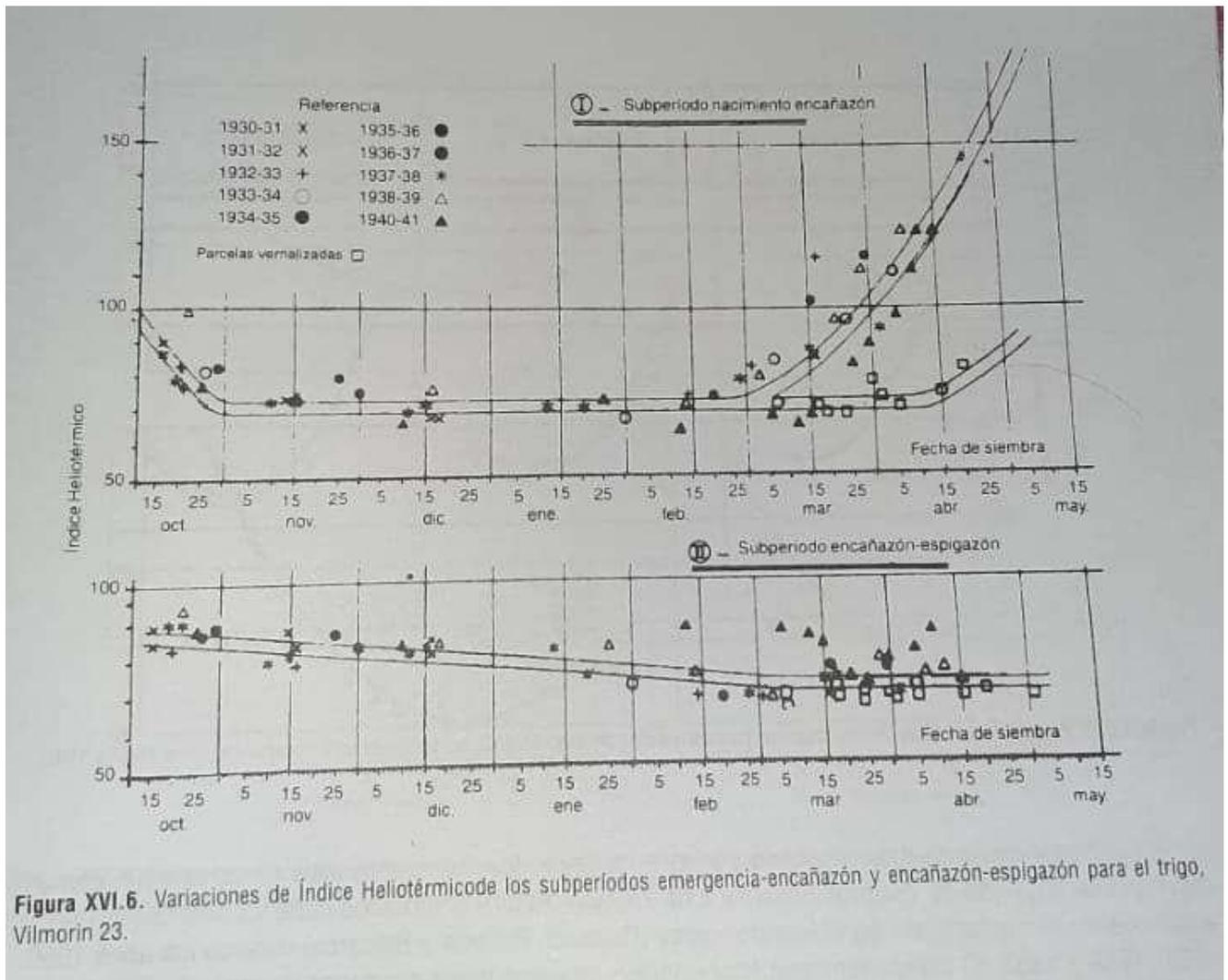
#### **1-Índice Heliotérmico**

El Índice Heliotérmico (H) tuvo origen en la tesis doctoral del bioclimatólogo francés H. Geslin (1944), como resultado de un ensayo de siembras continuadas con el trigo Vilmorin 23, durante 11 años (1930 a 1941) en Versailles (Francia). Su expresión es

$$IH = (\sum t \geq 20^{\circ}\text{C}) \text{ dd} / 100$$

es decir, el producto de la suma de temperaturas por el método directo acumuladas desde nacimiento a espigazón, multiplicada por el fotoperíodo medio del subperíodo (dd), se divide por 100 para obtener una cifra más simple.

La representación gráfica de la aplicación del IH se reproduce en la Figura XVI. 6.



Posteriormente, como resultado de un ensayo geográfico con muchos cultivares de trigo, Geslin pudo comprobar que los IH calculados para cada fecha de siembra, volcados en un gráfico producían, una curva característica para cada cultivar.

En la Argentina, la metodología desarrollada por Geslin produjo excelentes resultados en la caracterización de las exigencias de los distintos cultivares de trigo y de otros cultivos.

La primera aplicación del IH (Pascale, 1950) correspondió al resultado de un ensayo realizado en la Estación Agrometeorológica de Guatraché (Fig. XVI. 7) en el que se comprobó que el IH aplicado a 3 cultivares de trigo sembrados quincenalmente en los años 1947 y 1948 generaba curvas parabólicas, similares en la forma, pero diferentes en el valor de los IH, según el temoperíodo anual al que estuvieron expuestas las plantas, acorde con las distintas características de ambos inviernos: 1947 fue el más caliente y los IH acumularon una suma de temperaturas mayor, lo cual permitió suponer que la experimentación durante varios años produciría en promedio, una curva de IH característica de cada variedad.

La comprobación de este resultado se logró mediante los datos obtenidos en un ensayo con 37 cultivares de trigo -35 de *Triticum vulgare* y 2 de *Triticum durum*- sembrados cada 15 días desde marzo a octubre en tres estaciones agrometeorológicas (Castelar, Rafaela y Balcarce) durante los años 1950, 1951, 1952 y 1953. El comportamiento fotoperiódico de estos trigos era conocido por estudios previos (Pascale, 1952). Todo este material experimental fue analizado mediante la utilización del Índice Heliotérmico (Pascale y Damario, 1954).

El cómputo del IH de cada siembra generó parábolas diferentes para cada cultivar, semejantes en los 4 años. Se seleccionaron 4 curvas tipo (Fig. XVI.8) alrededor de las cuales se agruparon los demás cultivares, con características bioclimáticas definidas. El análisis de las curvas del IH de los cuatro grupos que tienen como patrones las parábolas

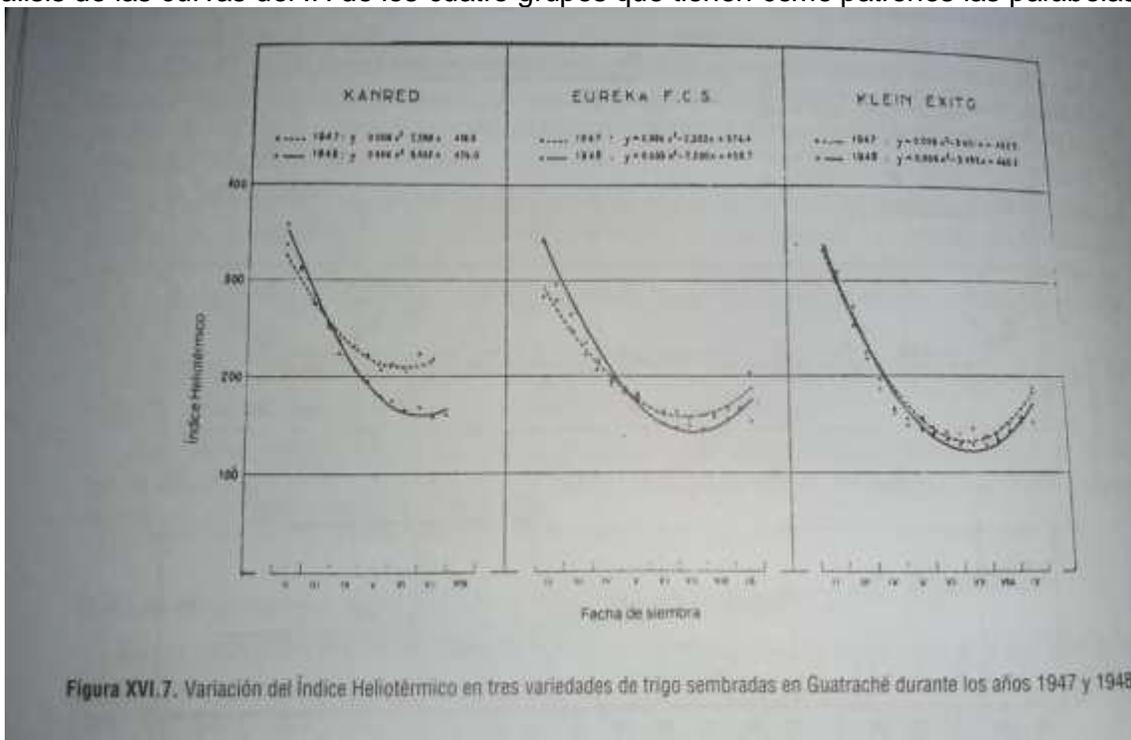


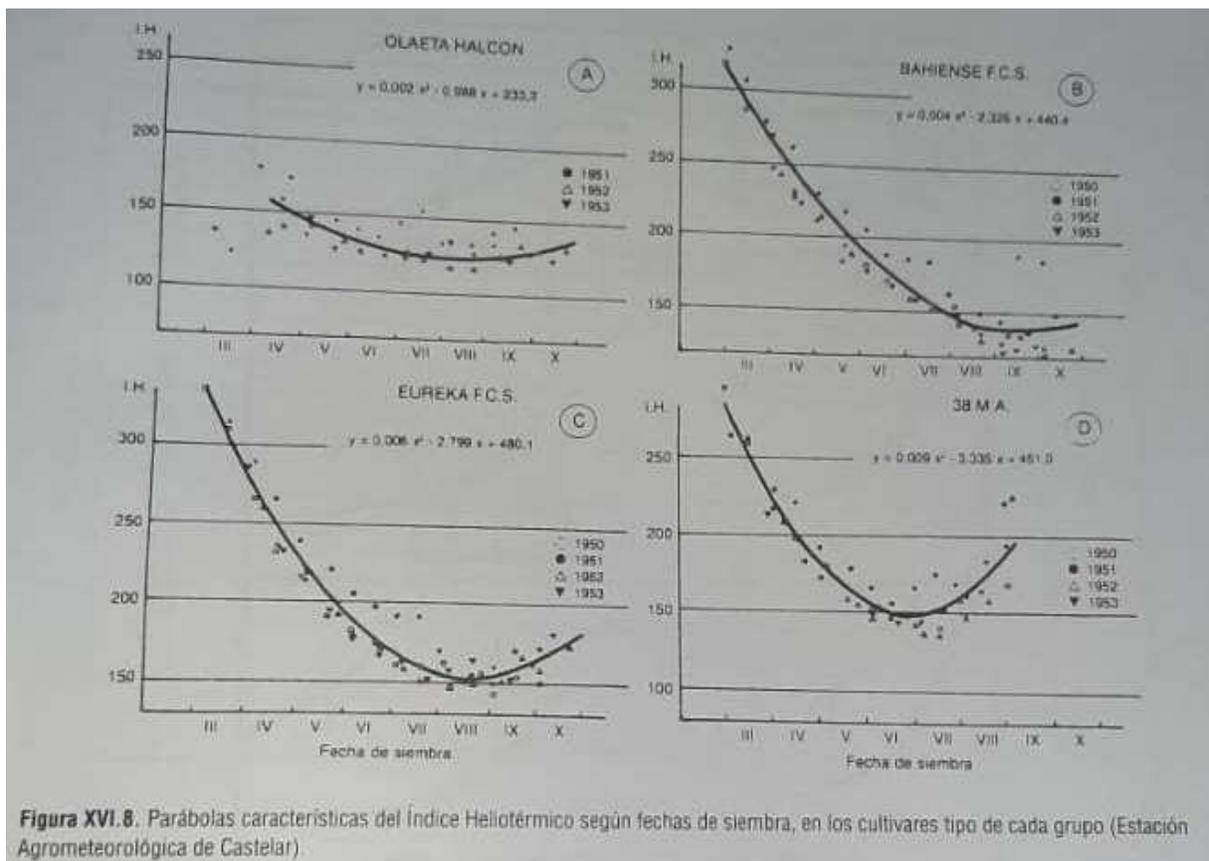
Figura XVI.7. Variación del Índice Heliotérmico en tres variedades de trigo sembradas en Guatraché durante los años 1947 y 1948.

de la Figura XVI.8 define las siguientes características bioclimáticas:

Grupo I. Son trigos precoces que no tienen exigencia fotoperiódica limitante para la espigazón. Sus exigencias en sumas térmicas son reducidas, ya que los IH en las etapas de crecimiento (nacimiento-encañazón) y desarrollo (encañazón-espigazón) son reducidos. Reaccionan ligeramente a la vernalización.

Grupo I. La característica bioclimática de los integrantes de este grupo consiste en que su espigazón se produce, cualquiera sea su época de siembra, a partir del momento que superan un umbral fotoperiódico elevado, por lo cual, acumulan suma de temperaturas y producen un IH superior al de todos los grupos. No tiene exigencia en bajas temperaturas.

Grupo II. También tienen exigencias fotoperiódicas elevadas similares a las del Grupo I, diferenciándose por tener cierta exigencia en frío en las siembras de fines de invierno. La reacción a la vernalización produce adelantos de sólo unos pocos días.



Los trigos integrantes de los Grupos II y III tienen «elasticidad de hábito», cualidad que permite un periodo de siembras extendido, sin ajustarse a una fecha precisa, dado que sus espigazones siempre serán tardías por el fotoperíodo elevado que requieren. Al

Grupo II pertenecen los trigos utilizados como verdeos invernales, práctica generalizada en los años de la experimentación.

Grupo IV. A diferencia de los precedentes, los cultivares de este grupo no tienen elasticidad de hábito y sus siembras deben hacerse en una fecha óptima, caso contrario, sus rendimientos disminuyen significativamente por insatisfacción de necesidades bioclimáticas particulares. Son los más exigentes en frío, por lo cual, las siembras posteriores al invierno muestran la mayor reacción a la vernalización, de hasta unos 15 días.

En Buenos Aires, campo experimental de la Facultad de Agronomía, las siembras de mediados-fines de septiembre de estos trigos, aún vernalizados, solamente alcanzaron a encañar, pero no a espigar, lo que permite suponer que el fotoperíodo local de 14,5 horas del mes de noviembre sería un factor limitante. Como consecuencia, las curvas de IH de las fases de desarrollo, cuando ocurre, muestran una fuerte inflexión hacia arriba por el alargamiento del ciclo.

La comprobación de que el IH es un índice bioclimático significativo, se demostró porque

además de mantener las curvas típicas a través de los años, también lograba expresión similar en distintos lugares de Siembra. La Figura XVI. 9 muestra cómo se generaron las mismas curvas características en Rafaela y Balcarce distantes unos 400 km al N y al S de Castelar. En ambas localidades las curvas de 3 cultivares de cada grupo fueron similares a los patrones típicos de la Figura XVI. 8.

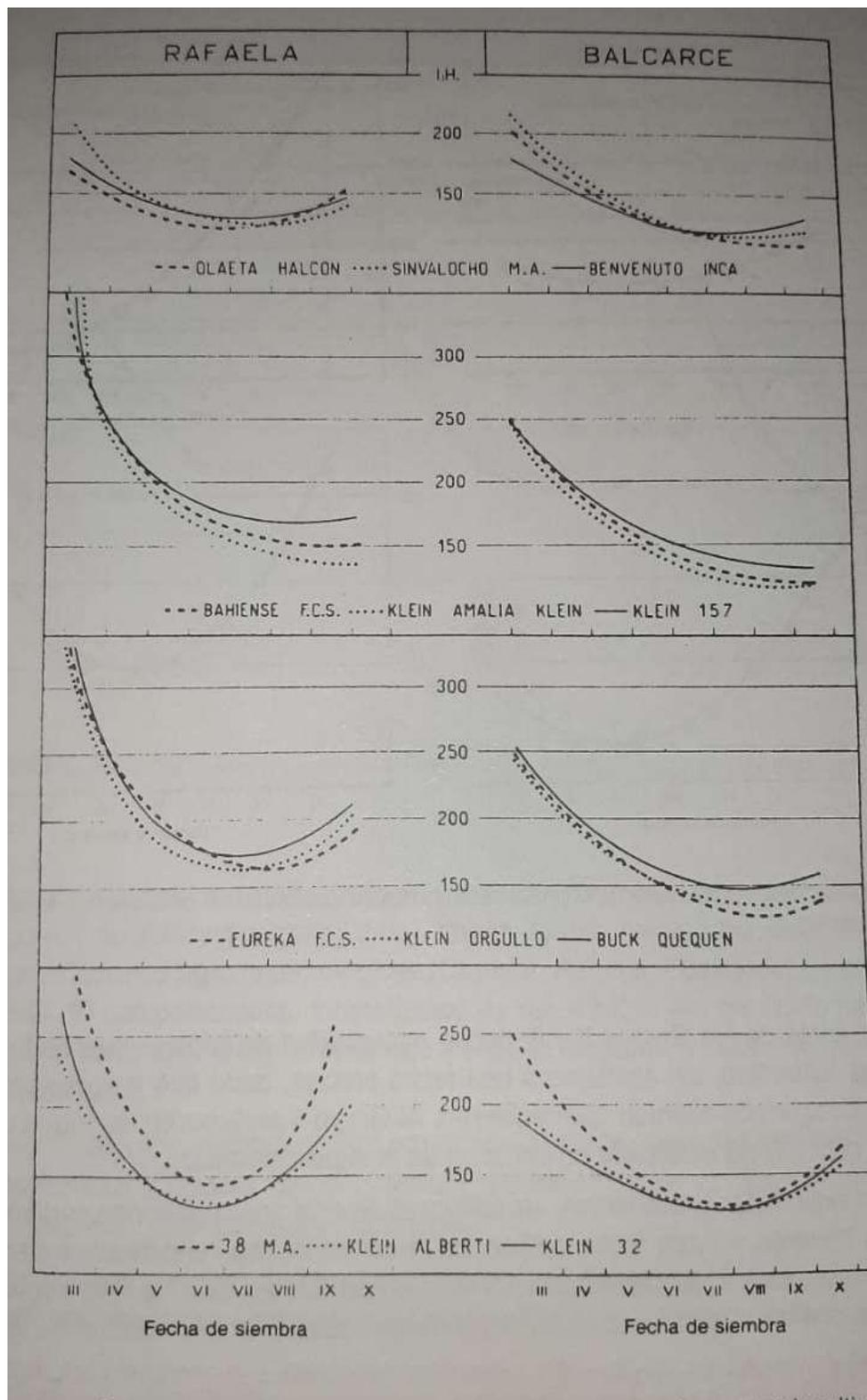
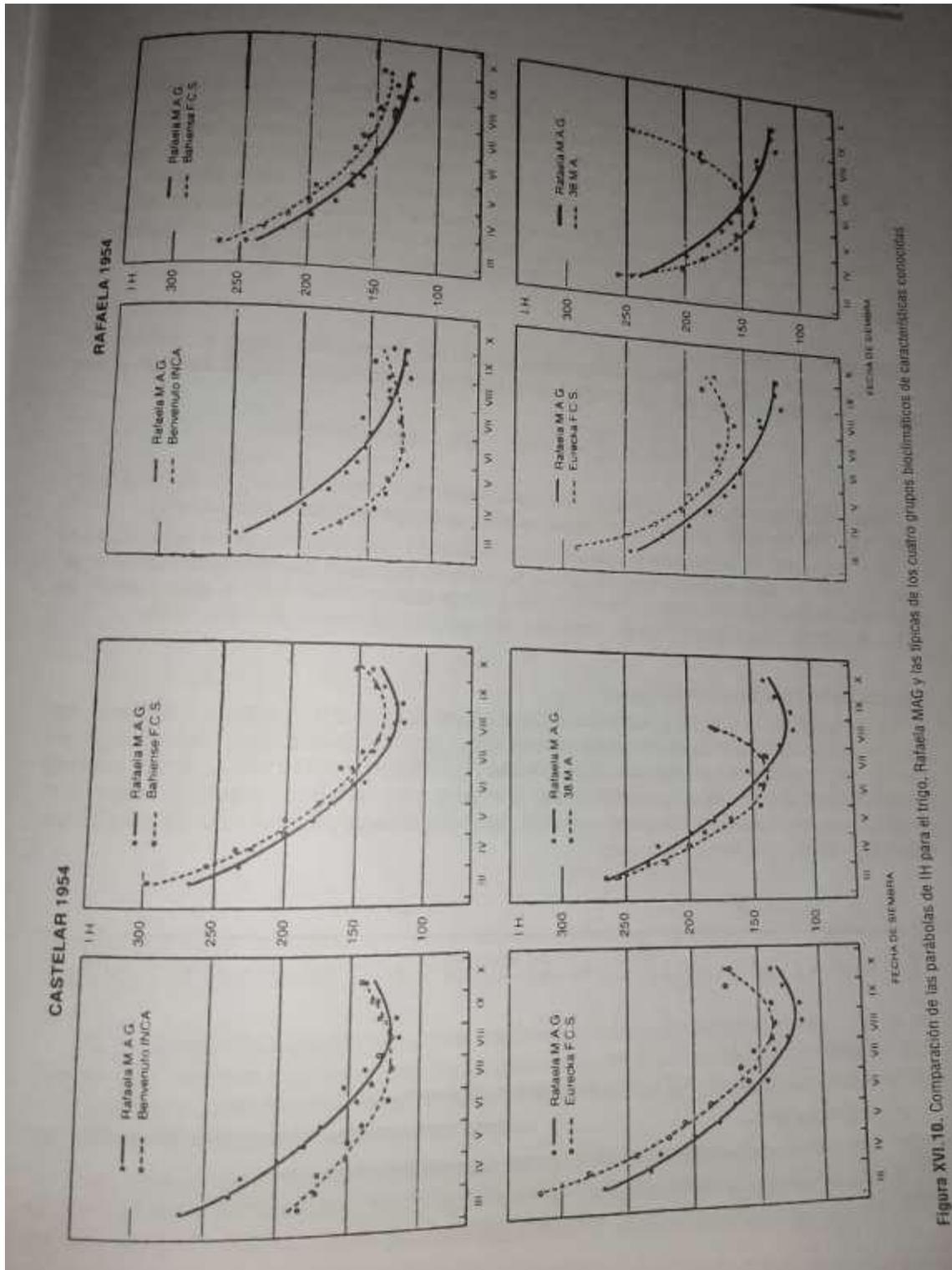


Figura XVI.9. Variación del Índice Heliotérmico según la fecha de siembra para los cuatro

grupos de cultivares en Rafaela y Balcarce.

Las características bioclimáticas mostradas por los cultivares típicos de cada grupo, permite conocer en un solo año de ensayos de siembras periódicas, cuales son las correspondientes a un trigo de exigencias bioclimáticas desconocidas (Pascale, 1955). Como ejemplo, en la Figura XVI.10 se reproduce la aplicación del IH a los resultados de un ensayo de siembras continuadas con un cultivar nuevo (Rafaela, MAG) realizado en dos estaciones agrometeorológicas, en comparación con los cuatro tipos bioclimáticos típicos.



De la observación de la Figura XVI. 10 surge que este cultivar debe incluirse en el Grupo II, es decir, es un trigo que no necesita frío para completar su desarrollo exigiendo, en cambio, días largos para espigar. Por tener índices más bajos que la curva de

comparación puede afirmarse que es más precoz que la variedad tipo, cualquiera sea la época de siembra. Estas deducciones confirman la bondad del IH como o bondad del IH como método de investigación bioclimática.

Otra aplicación del IH para el conocimiento de las exigencias bioclimáticas de un cultivo invernial se logra desdoblado el ciclo total en sus dos subperiodos componentes, a saber: nacimiento-encañazón y encañazón-espigazón. Los IH que se computan hasta el momento fenológico de observación del primordio floral indican el cumplimiento de las necesidades bioclimáticas para el desarrollo. Si el cultivar ensayado requiere frío, la vernalización artificial producirá IH tanto menores cuanto mayor sea la exigencia.

En la Argentina también se utilizó el IH para caracterizar las exigencias bioclimáticas en otras especies, entre ellas, el aplicado a cultivares de avenas, cebadas y centenos (Pascale y Damario, 1960) a linos textiles y oleaginosos (Pascale et al., 1967/68) y alpiste (Pascale y Giordano, 1961).

### 2-Unidades fototérmicas

Otra expresión de índice combinado usado en la Argentina que relaciona las sumas de temperaturas y el fotoperiodo de cualquier subperiodo de un cultivo son las Unidades Fototérmicas (U.E.T.) de Nuttonson (1955).

$$U.F.T. = (\sum t - t_b) \times dd; dd = \text{fotoperiodo medio}$$

Como puede observarse las U.F.T. son una generalización de los IH (sin dividir por cien) para aplicar entre fase y fase de cualquier cultivo, teniendo en cuenta las temperaturas bases particulares.

En la Figura XVI. 11 se muestra la aplicación de este índice a siembras continuadas de cultivares de soja de grupos de maduración del 0 al VIII para el subperiodo nacimiento-floración, quedando bien evidenciadas las diferencias de necesidades térmicas y fotoperiódicas de los distintos grupos según las fechas de siembra y las disponibilidades climáticas del lugar del experimento (Pascale, 1970).

### 3-Escala de tiempo biometeorológico

En el capítulo de metodología se explicó la investigación de Robertson (1968) para obtener su modelo tricuatrico (BTS-Escala de tiempo Biometeorológico) con una fórmula que relaciona el fotoperíodo diario (F) con las temperaturas máximas (TM) y mínimas (Tm) necesarias para completar cada subperiodo vegetativo. Para el trigo Marquis consideró: siembra-nacimiento, nacimiento-encañazón, encañazón-espigazón, espigazón-maduración c3erea y maduraci3on c3erea-maduraci3on dura. Para los c3alculos con este modelo se utiliza la f3ormula siguiente:

$$\sum_{S_1}^{S_2} \left[ \left( a_1 (F - a_0) + a_2 (F - a_0)^2 \right) \times \left( b_1 (TM - b_0) + b_2 (TM - b_0)^2 + b_3 (Tm - b_0)^2 + b_4 (Tm - b_0)^2 \right) \right] = 1$$

Siendo:  
 $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, b_3$  y  $b_4$ : coeficientes de regresión  
 F: fotoperíodo  
 TM: temperatura máxima diaria  
 Tm: temperatura mínima diaria  
 $S_1$  y  $S_2$ : fechas de comienzo y finalización del subperíodo en consideración

Siendo:

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, b_3$  y  $b_4$ : Coeficientes de regresión

F: fotoperíodo

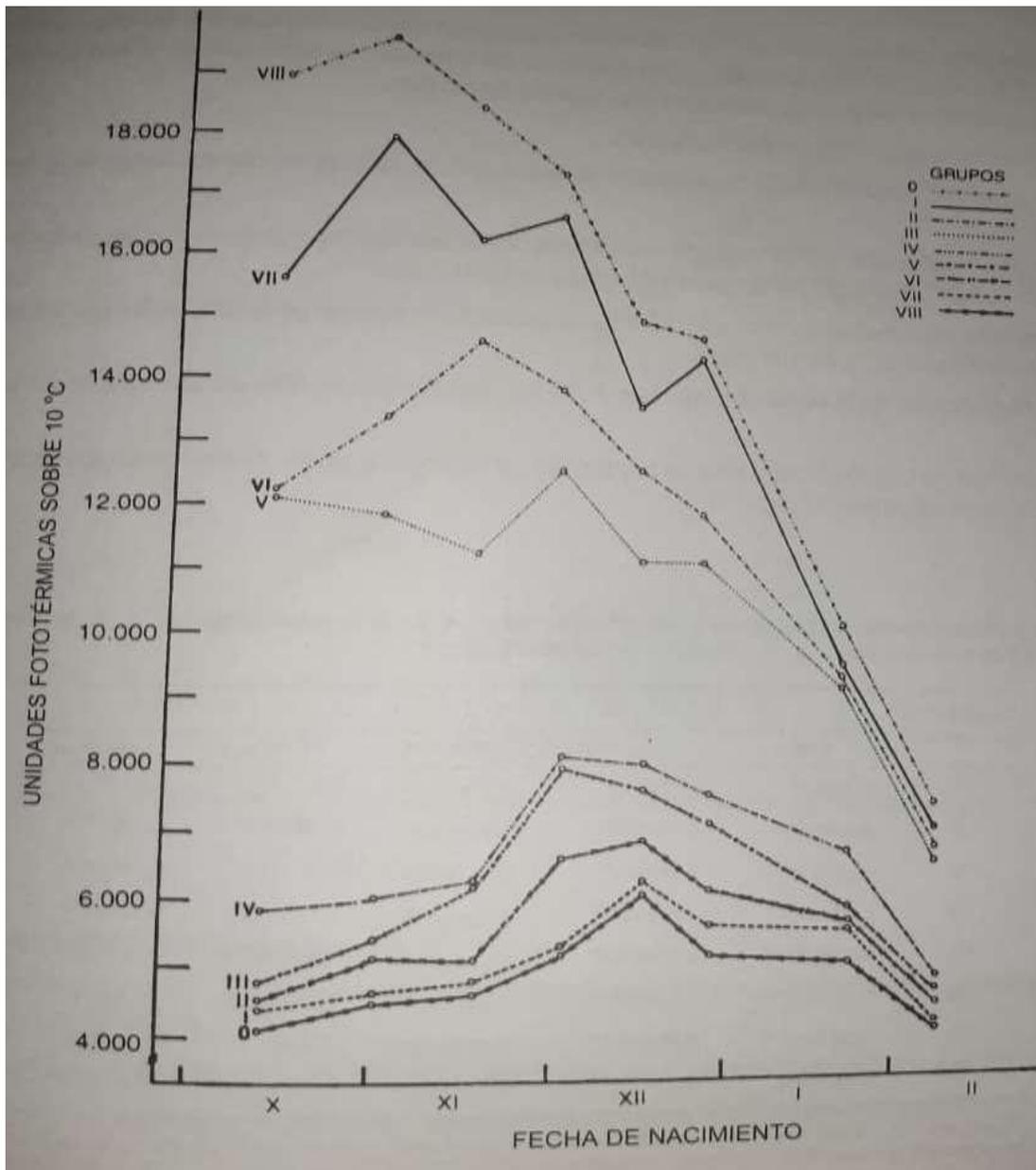
TM: temperatura máxima diaria

Tm: temperatura mínima diaria

valores reales de los años y épocas de siembra

en lugares del experimento

S y S: fechas de comienzo y finalización del subperíodo en consideracion



**Figura XVI.11.** Unidades fototérmicas sobre 10 °C ambas para el subperíodo nacimiento-floración en Buenos Aires (FAV), según grupo de cultivares de soja y época de siembra, promedio periodo 1962/73 - 1969/70.

Los coeficientes de regresión se calculan mediante la técnica de regresión iterativa que se repite hasta que se obtiene el valor 1 (aportes diarios para completar el subperíodo) o la máxima correlación entre la duración observada y estimada del subperíodo analizado, o bien hasta que el error estándar de estimación se mantenga estable en su valor mínimo. Para probar la generalización del BiS para otros cultivos se lo utilizó en un ensayo de siembras continuadas con soja (Ravelo et al., 1983). Se utilizaron tres cultivares del

Grupo IV de maduración: Clark, Bethel y Scott. Se efectuaron entre 2 y 5 Siembras anuales en el campo experimental de la FAV de Buenos Aires, con un intervalo de aproximadamente 3 semanas entre cada siembra y durante 7 campañas agrícolas (1962/63 a 1969/70). Del total de las 26 fechas de siembras, se eligieron tres fechas al azar para ser utilizadas como testigos en la verificación del modelo fenológico.

Las fases fenológicas consideradas fueron:

- Comienzo de floración (CFL): cuando aproximadamente el 10% de las plantas tienen las primeras flores.
- Fin de Fructificación (FFR): cuando los últimos ramilletes florales tienen los frutos formados y de aproximadamente 1 cm de longitud y no aparecen más flores.
- Comienzo de amarilleo de las hojas (CAH): cuando aproximadamente el 10% de las plantas comienzan a cambiar el color de sus hojas.
- Plenitud y caída de las hojas (PCH): cuando se han caído más del 50% de las hojas de las plantas.

En el análisis se utilizó el promedio de las fechas de ocurrencia de las fases fenológicas correspondientes a los tres cultivares considerados.

**Cuadro XVI.4.** Relación de regresión para el fotoperíodo ( $a_0, a_1, a_2$ ), la temperatura máxima ( $b_0, b_1, b_2$ ), y la temperatura mínima ( $b_0, b_3, b_4$ ), y para los subperiodos indicados.

**Cuadro XVI.4.** Relación de regresión para el fotoperíodo ( $a_0, a_1, a_2$ ), la temperatura máxima ( $b_0, b_1, b_2$ ), y la temperatura mínima ( $b_0, b_3, b_4$ ), y para los subperiodos indicados.

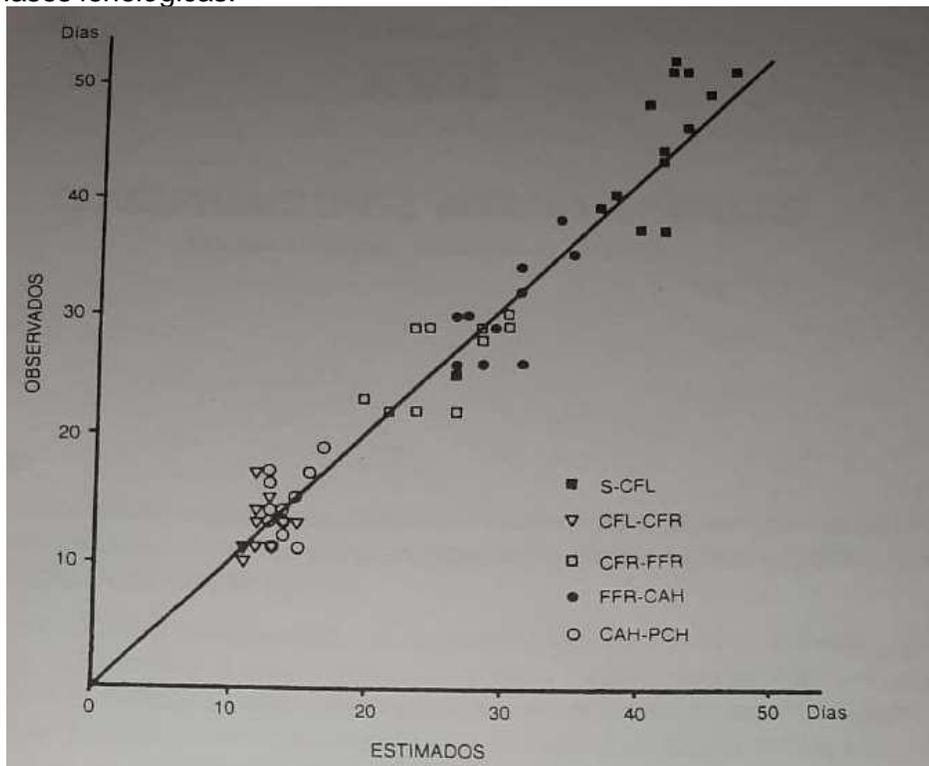
Coeficientes de regresión	S U B P E R Í O D O S				
	S-CFL	CFL-CFR	CFR-FFR	FFR-CAH	CAH-PCH
$A_0$	$0,273 \times 10^{-4}$	$0,722 \times 10^{-2}$	$-0,314 \times 10^{-3}$	0,0	0,0
$A_1$	$0,112 \times 10^1$	$0,194 \times 10^{-1}$	$0,172 \times 10^1$	$0,183 \times 10^1$	$0,216 \times 10^1$
$A_2$	$-0,683 \times 10^{-1}$	$0,390 \times 10^{-1}$	$0,105 \times 10^0$	$-0,123 \times 10^0$	$-0,138 \times 10^0$
$B_0$	$0,131 \times 10^2$	$0,132 \times 10^2$	$0,133 \times 10^2$	$0,133 \times 10^2$	$0,122 \times 10^2$
$B_1$	$0,906 \times 10^{-3}$	$0,873 \times 10^{-3}$	$0,798 \times 10^{-3}$	$0,866 \times 10^{-3}$	$0,106 \times 10^{-2}$
$B_2$	$-0,127 \times 10^{-4}$	$0,116 \times 10^{-4}$	$-0,114 \times 10^{-4}$	$-0,856 \times 10^{-5}$	$-0,135 \times 10^{-4}$
$B_3$	$0,319 \times 10^{-3}$	$0,294 \times 10^{-3}$	$0,291 \times 10^{-3}$	$0,219 \times 10^{-3}$	$0,317 \times 10^{-3}$
$B_4$	$-0,331 \times 10^{-4}$	$0,329 \times 10^{-4}$	$-0,359 \times 10^{-4}$	$-0,296 \times 10^{-4}$	$0,382 \times 10^{-4}$

S: siembra; CFL: comienzo de floración; CFR: comienzo de fructificación; FFR: fin de fructificación; CAH: comienzo amarilleo de las hojas; PCH: plenitud de caída de las hojas.

Los coeficientes de regresión desarrollados para cada estado fenológico (Cuadro XVI.4), fueron usados para estimar el número de días para cada subperiodo. La Figura XVI.12 muestra una estrecha relación entre el número de días estimados y el número de días observados para las 62 épocas de siembra consideradas. En general, la precisión de las

estimaciones fue aproximadamente la misma para todos los subperíodos.

El modelo fenológico BTS aplicado al cultivo de la soja permitió obtener estimaciones de subperíodos del cultivo lo suficientemente precisas como para utilizarlo en modelos de pronóstico de rendimiento o facilitar la interpretación de imágenes satelitales del cultivo. Asimismo, conocida la fecha de siembra, es posible estimar las fechas de ocurrencia de las distintas fases fenológicas.



**Figura XVI.12.** Relación entre el número de días estimados y el número de días observados para las 62 épocas de siembra consideradas.

#### 4-Unidades de desarrollo para la soja

Es importante señalar que Brown (1960) pudo derivar de varios experimentos las siguientes evidencias para el cultivo de soja:

- Cuando aumentan las temperaturas diurnas y nocturnas, necesita menos días para florecer.
- A medida que aumenta el fotoperíodo requiere más días para alcanzar la floración.
- Con nictoperíodos (inverso del fotoperíodo) de igual duración, las temperaturas promedios del subperíodo nacimiento-floración también son iguales.

De estas conclusiones dedujo que la inversa del nictoperíodo es un índice de la velocidad de crecimiento para llegar a floración en soja en función del aumento de las temperaturas y fotoperíodos involucrados.

Este índice que Brown denominó «Unidades de desarrollo de la soja (Soybean Development Units, SDU), señala a los 10°C como inicial del proceso biológico, 30 °C como la óptima y un rápido efecto depresor del crecimiento a partir de esta temperatura.

El índice biometeorológico SDU se transformó en uno agroclimático (suma de temperaturas efectivas) utilizado en la determinación de la aptitud sojera del territorio argentino en la clasificación agroclimática para el cultivo de la soja (Pascale, 1969).

## 16. CLASIFICACIONES AGROCLIMÁTICAS

Antonio J. Pascale - Edmundo A. Damario

### 16.1 Introducción

Los primeros intentos de comparaciones climáticas se basaron más en la descripción de las formaciones vegetales naturales, que a determinar una organización de los climas o regiones climáticas. Así surgieron las clasificaciones climáticas descriptivas del siglo XIX.

Las verdaderas clasificaciones climáticas son las denominadas sistemáticas o racionales, que usan valores climáticos definidos para explicar y ordenar los grandes paisajes naturales o las formaciones fitogeográficas. Köppen, iniciador de esta metodología, a partir de comienzos del siglo XX (Köppen, 1923) logró generalizar las formaciones naturales de vegetación mediante una relación empírica entre temperaturas y precipitaciones anuales. Con este mismo interés, Thornthwaite (1931) introdujo como elemento de clasificación el concepto de “eficiencia de la precipitación” y, posteriormente en 1948, con la definición de evapotranspiración potencial y el esquema del balance de agua, generalizó una clasificación de climas independientes de la fisonomía vegetal por utilizar valores puramente climáticos asignando un valor relativo a la precipitación.

Entre las clasificaciones climáticas y las clasificaciones agroclimáticas existen diferencias precisas y fundamentales. No es justificable aplicar las clasificaciones puramente climáticas a los complejos problemas de la práctica agropecuaria y forestal, pues ellas tienen un interés puramente geográfico que proporciona una idea general de los elementos mensuales y anuales del clima de las diferentes regiones del globo terrestre, insuficientes para abarcar innumerables relaciones bioclimáticas que presenta la diversidad de seres vivos y todo tipo de suelos. Desde el punto de vista agrícola tienen interés solo informático, ya que no son útiles para determinar la aptitud local o regional para la producción agropecuaria, al desconocer las múltiples relaciones del clima con los diversos elementos biológicos y físicos que intervienen en esta.

Las designadas como clasificaciones agroclimáticas “descriptivas” suponen un acercamiento a la solución de los propósitos de clasificación de climas con fines agrícolas, aunque sólo son modificaciones de las climáticas con designación de alguna de sus categorías según la aptitud para ciertos cultivos o grupos vegetales.

En cambio, el grupo de clasificaciones agroclimáticas “racionales” definen sus tipos con índices climáticos fijos, ordenados sistemáticamente y que, por su elección o forma de considerar, tienen significancia agrícola.

La “Guía de Prácticas Agrometeorológicas” (WMO, 1963), distingue a las clasificaciones agroclimáticas en cuatro grupos:

- Clasificaciones que usan elementos climáticos simples
- Clasificaciones que usan Índices agroclimáticos
- Clasificaciones para cultivos particulares
- Clasificaciones agrobotánicas

### **Clasificaciones por elementos climáticos simples**

Dos clasificaciones aplicadas en la Argentina: (Papadakis, 1951 y De Fina, 1949), sirven de ejemplo para ilustrar sobre las características de este grupo de clasificaciones.

La de Papadakis considera la influencia de la amplitud anual de la temperatura; mediante la temperatura mínima anual media, jerarquiza el rigor invernal en seis tipos y, con la temperatura media del mes más cálido del año, genera cuatro tipos relacionados con la posibilidad de maduración de cultivos indicativos. Además, establece un índice de humedad anual con ocho tipos diferenciados según magnitud y tres según la concentración estacional de la humedad. Esta clasificación tuvo posteriormente varias modificaciones con la inclusión de los conceptos de la evapotranspiración potencial y el de “clima mensual”.

De Fina, amplió considerablemente el número de jerarquías térmicas e hídricas con la finalidad de obtener unidades climáticas más definidas, facilitando así la formulación de analogías agrícolas. Con una notación especial considera las temperaturas medias del mes más caliente y del más frío del año, las precipitaciones de los trimestres más calientes y más frío, y además el porcentaje de precipitación caída en los meses restantes. De allí surgen 45 categorías térmicas, nueve categorías de precipitación para cada uno de los trimestres térmicamente extremos y cuatro categorías de porcentaje de precipitación en los seis restantes. Con ellas integradas en un denominado “quebrado termoplúvometro” se definen los “distritos agroclimáticos”.

La aplicación de la clasificación permite la posibilidad combinatoria de unos 20.000 distritos agroclimáticos en el mundo y, por analogía, se deduce que en todos los distritos con igual fórmula termoplúvométrica se pueden realizar los mismos cultivos con similares posibilidades de éxito.

Sin embargo, estas dos clasificaciones continúan considerando valores climáticos puntuales anuales o mensuales, lo que limita su aplicación para explicar relaciones climático-biológicas sólo posibles de definir con la utilización de índices bio y agroclimáticos especiales.

### **Clasificaciones por índices agroclimáticos**

Las clasificaciones establecidas utilizando índices bio y agroclimáticos se independizan de los conceptos y métodos clásicos rígidos de las clasificaciones climatológicas. Selianinov (1961) fue el primero en establecer comparaciones regionales mediante índices agroclimáticos, es decir con valores de clima específicamente aplicables a los fines agrícolas. Señalo los siguientes índices: fechas medias de primera y última heladas, duración del periodo libre de heladas, duración de periodos con temperaturas sobre distintos niveles, duraciones de sequías según un índice hidrotérmico, temperaturas medias y absolutas de distinta significancia climática, etc. Es decir, todos parámetros

agrometeorológicos útiles para caracterizar la aptitud agroclimática de un área o región teniendo en cuenta, los requerimientos generales para la agricultura y en ciertos casos, para definir la posibilidad de determinados cultivos.

### **Clasificaciones por tipos agroclimáticos de cultivos**

Las clasificaciones agroclimáticas generales que tratan de definir una misma aptitud agrícola para diferentes regiones, solo pueden concretar la definición de climas que, en general explican la existencia de un conjunto de especies de comportamiento similar. En cambio, cuando el interés es la determinación del clima de una especie agrícola en particular, no resultan de utilidad las clasificaciones mencionadas precedentemente.

El concepto básico de una clasificación por tipos agroclimáticos de cultivos específicos se apoya en la consideración de sus necesidades bioclimáticas propias, es decir en el agroclima que, a través de distintos componentes principales o derivados y de sus variaciones temporales, hace posible su existencia y producción. Estos agroclimas componen toda la gama de aptitudes, desde las que satisfacen exigencias biológicas mínimas, hasta las que muestran limitantes extremas por exceso, pasando por condiciones de aptitud óptima, cuando todos los elementos agroclimáticos se combinan para ofrecer una producción máxima.

Entre las 8 clasificaciones de este tipo mencionadas en la Guía de Practicas Agrometeorológicas (WMO, 1963) se encuentran la de Burgos (1958) para papa simiente y palma datilera y la de Pascale y Damario (1962) para trigo.

Burgos (1958) propuso las normas que deben considerarse para desarrollar una clasificación agroclimática de cultivos específicos:

- a. Determinación del tipo bioclimático del cultivo.
- b. Valoración Agroclimática de la región de origen de la especie.
- c. Valoración del agroclima de la región mundial de difusión del cultivo.
- d. Valoración del agroclima de las regiones en donde la experiencia ha demostrado el fracaso del cultivo.
- e. Valoración de índices agroclimáticos derivados de trabajos experimentales, sobre requerimientos bioclimáticos de la especie.

Dado que esta clasificación sirve para identificar las áreas geográficas con determinada aptitud agroclimática, Burgos introduce los términos “regiones” y “zonas” para denominar las jerarquías o clases correspondientes a cada uno de los elementos bioclimáticos utilizados en la clasificación. La explicación sobre el procedimiento operativo de una clasificación agroclimática específica, se ejemplifica con la desarrollada en la Argentina para el pistachero, un frutal perenne, que se toma como referencia para desarrollar el método agroclimático de ubicación de áreas posibles de un territorio para introducir un cultivo nuevo.

### **Clasificaciones agrobotánicas**

Las clasificaciones agrobotánicas intentan describir regiones para propósitos agrícolas o biológicos sin el uso de elementos meteorológicos, toman en cuenta el estado

de la vegetación natural o cultivada y sus reacciones biológicas y productivas en los distintos ambientes. Un ejemplo, lo constituye el método de “Reconocimiento Ecológico por Plantas Índices” de Defina (1946), basado en la forma de comportarse una serie prefijada de plantas cultivadas de exigencias conocidas, comprendiendo 12 cultivos perennes (cacao, ananá, banano, limonero, datilero, olivo, higuera, vid, nogal, duraznero, peral, y manzano) ordenados por su exigencia calórica y susceptibilidad de daños por heladas de mayor a menor, y de 6 cultivos anuales: 3 estivales ( algodón, sandía y maíz) para manifestar la disponibilidad calórica y 3 invernales (trigo, avena y centeno) para caracterizar la intensidad de enfriamiento disponible. A grandes rasgos, hace posible detectar las condiciones climáticas de un lugar mediante un puntaje asignado a cada cultivo en el reconocimiento, de acuerdo a su grado de abundancia, cantidad de rendimiento y su capacidad para madurar sus frutos.

### **Clasificación por tipos agroclimáticos del pistachero (Pistacia vera L.)**

La inclusión de esta clasificación (Damario y Pascale, 1991) tiene el propósito de demostrar, con la resolución de un problema práctico, la aplicación de la mayoría de los índices biometeorológicos y agroclimáticos presentados en los capítulos anteriores y con la cual fue posible examinar la aptitud para la introducción de una especie nueva y anticipar el área donde encontraría las mejores disponibilidades para su cultivo en la Argentina.

La revisión bibliográfica mundial hizo posible precisar las exigencias y tolerancias bioclimáticas de la especie y analizar las características climáticas de las áreas de origen y difusión mundial. Se aplicaron al efecto índices agroclimáticos simples cuyo ordenamiento y jerarquización condujeron a la clasificación de tipos agroclimáticos mundiales que, aplicada al país, permitió limitar el área donde este nuevo cultivo podría prosperar y, dentro de ella, diferenciar las zonas con mayor aptitud productiva.

El pistachero o alfénsigo, es un frutal de cultivo poco difundido en el mundo, probablemente a causa de sus exigencias bioclimáticas rigurosas que se estableció en zonas con climas similares al de su región de origen, cuyas características termo hídricas son difíciles de encontrar reproducidas totalmente en el Hemisferio Sur. Similares dificultades se han presentado para la introducción en la Argentina de otras especies del Hemisferio Norte las que, en parte, pudieron salvarse mediante la ubicación geográfica más apropiada donde pudieran satisfacer mediante el manejo adecuado del cultivo el máximo posible de sus necesidades biológicas y, posteriormente, por la obtención de cultivares adaptados a las nuevas condiciones ecológicas.

El pistachero es un frutal adaptado a climas semiáridos, es de difícil implantación, aunque por su condición de longevo y de requerir pocos cuidados posteriores, lo hace recomendable para áreas que se determinan en el estudio.

### **Características botánicas y fenológicas de la especie**

El género *Pistacia* pertenece a la familia Anacardiaceae comprendiendo unas 20 especies de las cuales solo *P. vera* es utilizada por sus frutos comestibles, mientras que

algunas de las otras se usa como portainjertos, técnica desarrollada en todos los montes cultivados.

El género Pistacia es de origen remoto, existiendo desde antes de la Edad Terciaria, según fósiles encontrados en la Isla Madera del Mar Mediterráneo (Evreinoff, 1957). P. vera se encuentra al estado silvestre en áreas del Turquestán, Irán, Turquía, Siria, Afganistán y Paquistán, consideradas como centros de origen por distintos autores (Khalifé, 1959). Los frutos de las plantas de estos lugares fueron sin dudas, la fuente de su expansión al Mediterráneo y a EE.UU.

El Pistachero es una planta dioica con protándria más o menos acentuada de difícil diferenciación sexual hasta que comienza a florecer, atrasándose la floración de las plantas femeninas unos diez días en las variedades comerciales. Las pequeñas flores de color púrpura forman un racimo compuesto que tardan progresar desde la base hacia el ápice entre 12 y 15 días. Los frutos son drupas oval-oblongas con pericarpio levemente coloreado y semilla de color verde claro, rica en aceite y proteínas.

En Irán, los mejores montes de pistacheros crecen en una extensa planicie a unos 1.200 m sobre el nivel del mar, considerada entre los peores desiertos de la Tierra. Estas condiciones extremas de amplitud térmica diaria y anual, así como de sequedad atmosférica y escasa agua edáfica para las funciones vitales mínimas, determinan naturalmente una planta rústica, de escasa vegetación verde, con tejidos protectores de la evaporación y aspecto arbustivo similar al de las otras especies de lugares desérticos. Este aspecto lo pierde cuando se lo cultiva y se lo forma mediante podas adecuadas.

El pistachero comienza el descanso invernal en otoño y reinicia la actividad vegetativa en primavera cuando la temperatura resulta favorable para el hinchamiento de las yemas, tanto florales como foliares. La secuencia del proceso fenológico es: floración masculina primero y femenina después, foliación y crecimiento de las ramitas hasta aproximadamente dos meses desde la floración, momento en que comienza el crecimiento del fruto cuya maduración se desarrolla durante los meses de mayor temperatura. El amarilleo de las hojas se produce a fines de verano-comienzo de otoño, coincidiendo su caída con el fin de la maduración, con temperaturas en descenso. La dormición de la planta comienza con un valor térmico similar al de la iniciación de la actividad vegetativa.

El ciclo anual del pistachero se compone de un subperíodo de descanso y un subperíodo vegetativo. El comienzo de la actividad vegetativa en el Hemisferio Norte se produce desde fines de marzo hasta la segunda semana de abril y la maduración desde fines de julio hasta agosto-septiembre, según se registra en las áreas silvestres y de cultivo (Turquía, Italia, y EE.UU). En el Hemisferio Sur (Australia), el subperíodo vegetativo se desarrolla desde fines de septiembre – octubre hasta fines de febrero- comienzos de marzo.

### **Exigencias bioclimáticas y de cultivo**

El pistachero es una especie perenne caducifolia termocíclica y afotocíclica, caracterizada por la exigencia en una gran amplitud térmica anual o diaria.

La exigencia en frío durante el descanso es la principal condición que debe satisfacer el pistachero para que las plantas florezcan normalmente sin anomalías que puedan comprometer el rendimiento del cultivo (Whytehouse, 1958; Türel y Ayfer, 1959; Crane y Takeda, 1979; Procopiov, 1973), especialmente por acentuación de la protándria floral debido a la falta de enfriamiento.

En las áreas donde *Pistacia vera* se encuentra en estado silvestre, las plantas disponen de un invierno con temperaturas muy bajas que lo señalan como muy resistente al helamiento durante el período de latencia el cual, siendo además prolongado, posibilita la acumulación de un enfriamiento suficiente para poder satisfacer los requerimientos del desarrollo.

Las exigencias mínimas en “horas de frío” (HF) no son totalmente conocidas y deben variar entre los cultivares. Quizás pueda tomarse como valor Ancestral de esta necesidad bioclimática la cantidad de HF normales en un área donde el cultivo prospera y, simultáneamente se encuentra al estado silvestre. Como ejemplo Gaziantep en Turquía, registra alrededor de 900 – 1.000 horas con temperaturas inferiores a 7 °C durante el periodo de descanso del pistachero. El cultivar Kerman, mundialmente muy difundido requiere un mínimo de 1.000 HF (Marranto y Crane, 1982). Estos valores del enfriamiento durante el descanso disminuirán cuando se utilicen portainjertos de menor exigencia en frío (*P. terenthus*, *P. atlántica*) o cuando por mejoramiento genético se obtengan cultivares adaptados a regiones de temperatura invernal más elevada (Maggs, 1981). Se tiene referencia de que en Israel se han obtenido cultivares que cumplen su periodo de descanso con menos de 500 HF.

Lugares donde el cultivo no prosperó o lo hizo de manera deficiente, carecen de suficiente capacidad vernalizante: Sfax (Tunez) con 280 HF, Rodas (Grecia) con 144 HF e indio (California, EE.UU) con 370 HF, son ejemplos en este sentido.

La historia de la implantación del cultivo en EE.UU. es un ejemplo de la ubicación en áreas donde logro satisfacer sus necesidades en frío. Su difusión se generalizó en algunos valles de California, pues las tentativas fracasaron en otros Estados por causa de los inviernos demasiado calientes. En la Región de Los Ángeles, la fructificación era errática y sólo se producía después de inviernos fríos o en árboles que crecían en lugares altos. En ciertos lugares de California y Arizona con temperaturas medias del mes más frío de entre 9.5-11 °C, los pistacheros solamente florecían y producían satisfactoriamente en dos años de cada cinco por falta de suficiente enfriamiento invernal, mientras que en Indio (California), con 12.3 °C, el cultivo no progresó por la misma razón. Bakersfield (California), con temperatura media del mes más frío de 8.3°C, podría representar la condición térmica invernal límite para el pistachero, en tanto que la de 7.1°C en Chico (California) alcanzaría para satisfacer las necesidades de frío para todos los cultivares ensayados en esa estación experimental (Joley, 1969).

El pistachero es un cultivo firmemente establecido en California, en el Sur del Valle de San Joaquín, concentrado en los condados de Madera y Kern, donde las temperaturas medias en enero son suficientemente bajas, algo menos de 7.0°C.

En las áreas pistacheros de Turquía, temperaturas medias de 5,5-6,9°C en el mes de Enero y 7.0-7.5 °C como promedio de los tres meses más fríos del año, aseguran una buena dormición del pistachero.

En Grecia la temperatura media del mes más frío entre 7 y 8 ° C parece ser la condición invernal que asegura una buena floración. En las islas griegas del este del Mediterráneo, el atraso normal en la floración femenina con respecto de la masculina es de un mes, debido a los inviernos suaves con temperaturas medias del mes más frío superiores a 10°C,

Los cultivos en alturas superiores a los 1.000 metros, satisfacen la exigencia en frío, pero solo prosperan si las temperaturas estivales permiten la maduración de los frutos, quedando la pregunta de cuanto se puede descender en altura sin comprometer la necesidad de enfriamiento en el periodo de descanso, en la región de Catania(Sicilia, Italia), el límite superior de cultivos es 800 m sobre el nivel del mar, descendiendo hasta los 400 – 600 m en la parte occidental del volcán Etna, con 800 – 900 horas por debajo de 7 ° C durante el descanso.

Aunque la intensidad del enfriamiento invernal es fundamental para seleccionar áreas pistacheras, la etapa vegetativa de las plantas debe corresponderse con una termofase positiva anual de temperaturas suficientemente altas. La gran amplitud térmica anual es característica del clima de la región donde pistachero se encuentra al estado silvestre (entre 22- 26°C). La temperatura media del mes más caluroso del año es elevada, tanto en las regiones de origen del pistachero como en las del cultivo tradicional (entre 28-32°C). Esto indica la necesidad de ubicar áreas con veranos calurosos para satisfacer las necesidades calóricas de la vegetación, así como prolongados para permitir la normal maduración de los frutos especialmente de los cultivares tardíos que son los más comunes.

De acuerdo con los registros fenológicos de los montes experimentales conducidos en Chico, la floración se produce en las dos primeras semanas de abril (temperatura media entre 14° C y 15°C) pero en otras zonas californianas con temperaturas primaverales superiores, tales como el Valle de San Joaquín y en el Desierto del Mojave a 600 m sobre el nivel del mar, ambos con temperaturas medias de abril entre 15,5° y 16,5°C, se adelanta una semana.

Obviamente a medida que se descende en altura y aumenta la temperatura de la termosfase positiva se adelanta el comienzo y se acorta la duración del periodo vegetativo.

Temperaturas elevadas durante el periodo vegetativo son también fundamentales para que la maduración de los frutos se produzca adecuadamente. En el jardín botánico de Kew cerca de Londres, las plantas florecen y forman los frutos, pero no llegan a madurar pues la temperatura media del aire en septiembre (mes de maduración) es de 14°C y la del mes más caluroso del año apenas es de 17,5 °C. Además el verano debe ser prolongado, para lograr la maduración de las variedades más tardías.

El comienzo de la actividad vegetativa debe coincidir tanto con un nivel térmico adecuado como con la ausencia de heladas, a las que parece sensible ser en la floración - brotación.

Por las características de las áreas de origen y difusión del pistachero, el periodo de heladas finaliza con mucha anterioridad al comienzo del periodo vegetativo. Hay poca información sobre su resistencia a las temperaturas congelantes durante la fase de la floración, aunque en varios informes se establece como condición indispensable la ausencia de heladas en ese momento fenológico.

Su carácter biológico más típico es la resistencia a la sequía, no comparable a la de ningún otro frutal. En las áreas de Alepo (Siria) donde se lo encuentra al estado silvestre, consideradas con condiciones ecológicamente ideales para el cultivo, se registran alrededor de 350 mm precipitación anual, con veranos totalmente sin lluvias.

Se considera que los cultivos en lugares con menos de 300 mm anuales necesitan de irrigación y, aunque el pistachero tolera la sequía estival, los rendimientos aumentan sensiblemente cuando se riega. En Chico (California, EE.UU.) un par de riegos en verano prolongan el periodo vegetativo, demorando la caída de las hojas hasta octubre – noviembre, mientras que en secano la defoliación se producen en agosto.

La ocurrencia de tiempo húmedo durante la maduración de los frutos es un factor adverso a la producción. El tiempo seco, predominante en el transcurso del subperiodo vegetativo en todas las áreas donde el cultivo ha prosperado, debe continuar durante el proceso de maduración de los frutos pues, si en ese lapso, el tiempo es húmedo, con lloviznas o lluvias frecuentes, el endocarpio dehiscente facilita la entrada de agua, favoreciendo el desarrollo de enfermedades que desmerecen la calidad, dificultan la cosecha y disminuyen los rendimientos.

En los meses de agosto o septiembre, en que se produce la maduración en el Hemisferio Norte, la precipitación es prácticamente nula en las áreas silvestres, y reducida en las áreas de dispersión. En el Hemisferio Sur es difícil encontrar áreas térmicamente aptas para el pistachero que tengan en la maduración regímenes hídricos similares a aquellos; por ejemplo, En Australia donde se promueve el cultivo, llueve en esos meses entre 20 y 40 mm.

Las plantas crecidas en áreas de veranos con temperaturas muy elevadas y precipitaciones escasas o nulas señalan la resistencia del pistachero frente al gran poder evaporativo del ambiente atmosférico con esas características. El pistachero es resistente a la sequía atmosférica, aunque si esta coincide con la floración puede reducir los porcentajes de fecundación.

Con respecto a los requerimientos edáficos el pistachero, desarrolla un sistema radicular potente y profundo, prospera en suelos pobres como ninguna otra especie frutal, aunque prefiere los arcillo-arenosos profundos, bien drenados y con tenor calcáreo elevado. En Italia se adapta a los terrenos rocosos y calcáreos como los de Sicilia occidental o a los ácidos, pobres en calcáreos, de la zona del volcán Etna, siendo denotar los cultivos en suelos sicilianos de lava con afloramientos rocosos, consociado con especies tan rusticas como *Opuntia ficus indica*.

### **Caracterización y clasificación agroclimática de la región de origen y áreas de dispersión**

El análisis de la información bioclimática precedente y la recopilación de valores climáticos de áreas de dispersión mundial de este frutal, permite completar los datos requeridos para desarrollar los tres aspectos perseguidos en su clasificación agroclimática, a saber: 1) deducción y clasificación de Índices Agroclimáticos; 2) determinación de los tipos agroclimáticos mundiales y valorar su aptitud para el cultivo; y 3) ubicación de la posible área pistachera en la Argentina y denominación de los tipos agroclimáticos existentes.

En el Cuadro XVII.1 se indican, para cada subperíodo los principales valores térmicos climáticos mundiales considerados como índices representativos de las disponibilidades para la satisfacción de la exigencia en frío invernal y calor estival, así como la precipitación semestral acumulada y la lluvia en el mes de la maduración.

Con la finalidad de facilitar el análisis, la duración de ambos subperiodos se consideró integrada respectivamente, por los seis meses más fríos y los seis meses más calientes, aunque en realidad, en el pistachero, el subperíodo vegetativo está acotado por el bioperíodo de 15 °C y el resto del año es el subperíodo de descanso.

Lamentablemente resultó muy reducida la información referente a fecha media de última helada de las localidades incluidas en el cuadro, aunque la falta de citas en la bibliografía hace suponer que no es problema en el área de cultivo.

En el cuadro, las localidades están ordenadas por países de acuerdo al nivel de producción, indicándose con un asterisco aquellas ubicadas en las áreas de origen.

El ordenamiento de los valores climáticos, según una escala que tenga en cuenta, el rango cubierto en la totalidad de la región de dispersión, permite establecer una primera clasificación agroclimática, mediante la cual calificar las aptitudes pistacheras de las diferentes áreas.

Dentro de cada subperíodo, deben considerarse aquellos valores climáticos máximos y mínimos que la bibliografía analizada aconseja como los más adecuados para describir las características de ambos subperiodos en relación a la posible satisfacción de las principales exigencias y tolerancias biometeorológicas del pistachero, a saber:

- a. Adecuado enfriamiento durante el subperíodo de descanso
- b. Suficiente calor durante el subperíodo vegetativo para vegetar normalmente y alcanzar la maduración total de los frutos.
- c. Ausencia de heladas en floración.
- d. Atmósfera seca y escasas lluvias en el mes final de la maduración.

Cuadro XVII.1. Valores agroclimáticos de las regiones de origen (\*) y de cultivo del pistachero.

Países y Localidades	Ubicación y altitud			Subperíodo de descanso					Subperíodo vegetativo					Tipo de agroclima			
	Lat.	Long.	Alt. s.n.m.	Temperatura			Horas de frío	Precip. total	Temperatura mes más caluroso		Bioperíodo da 15 °C				Fecha media de última helada		
				mes más frío	mínima absoluta	mínima anual			media	máxima media	Fecha de comienzo	Duración	Suma de temp.			Lluvia Total	
																	°C
IRAN																	
1- Isfahan*	32 34 N	51 44 E	1 773	2,2	-2,8	-19,4	1 340	98	28,0	36,7	15-IV	197	1 500	54	0	-	AA'aa'
2- Kerman*	30 21 N	57 06 E	1 859	5,8	-2,8	-15,0	1 050	118	28,3	38,2	6-IV	206	1 730	10	0	-	AA'aa'
3- Meshad*	36 17 N	59 36 E	848	-6,2	-6,8	-23,0	2 310	180	25,2	35,5	21-IV	370	1 520	50	5	-	AB'aa'
4- Isfahan'	35 43 N	53 21 E	1 222	2,2	-2,8	-20,6	800	317	29,7	37,2	12-IV	300	1 850	29	2	-	AA'aa'
TURQUÍA																	
5- Ankara	39 57 N	32 03 E	891	-1,0	-4,4	-26,0	1 990	330	23,3	39,6	7-V	149	810	137	14	-	AC'aa'
6- Gaziantep*	37 00 N	31 15 E	915	2,5	1,0	-	1 170	279	27,5	-	27-IV	177	1 460	73	4	-	AA'aa'
7- Urfa	37 07 N	38 46 E	540	5	1,1	-12,2	740	402	31,1	38,9	13-IV	209	2 070	40	7	-	AA'aa'
EEUU de NA																	
8- Bakersfield	38 20 N	119 10 O	121	8,3	2,5	-	830	130	28,6	38,4	29-III	226	1 770	24	2	21-III	CA'aa'
9- Chico	38 42 N	121 50 O	62	7,3	-	-	1 720	584	26,1	-	16-IV	193	1 270	47	8	26-III	BA'aa'
10- Davis	38 45 N	121 45 O	15	2,4	2,7	-	1 470	377	24,8	35,2	18-IV	198	950	42	4	17-III	BC'aa'
11- Fresno	38 48 N	119 43 O	98	7,4	4,1	-8,3	1 040	708	37,4	37,2	14-IV	201	1 580	29	2	9-III	BA'aa'
IRÁN																	
12- Ahad*	38 12 N	37 10 E	390	5,8	1,3	-12,8	920	327	28,8	36,6	11-IV	209	1 640	35	0	-	AA'aa'
13- Darmas*	33 30 N	56 20 E	920	7,0	2,2	-6,1	860	302	27,5	37,2	9-IV	217	1 990	24	8	-	AA'aa'
GRECIA																	
14- Atenas	37 58 N	23 43 E	105	6,0	6,0	-6,7	470	404	27,2	28,3	16-IV	210	1 510	66	10	-	CA'aa'
15- Rodas	36 20 N	28 13 E	90	12,8	10,8	-1,1	30	519	26,4	33,3	15-III	273	1 880	14	5	-	CA'aa'
AFGANISTAN																	
16- Kabul*	34 30 N	64 13 E	1 815	-3,8	-7,8	-21,1	2 040	233	24,6	33,5	29-IV	166	1 030	44	1	-	AC'aa'
ITALIA																	
17- Bivona	37 25 N	13 15 E	503	8,4	4,7	-	680	585	26,5	32,6	21-IV	197	1 370	195	21	-	CA'aa'
18- Capriacotta	37 00 N	14 03 E	588	7,4	4,0	-	940	448	25,0	31,4	30-IV	185	1 320	156	22	-	BA'aa'
19- Mazzara*	37 47 N	14 16 E	600	7,7	4,0	-	817	391	26,2	33,3	24-IV	189	1 310	134	18	-	CA'aa'
IRÁN																	
20- Rashtik*	35 39 N	62 01 E	-	2,4	2,8	-32,8	1 510	240	28,4	36,3	17-IV	176	1 450	12	0	26-III	AA'aa'
IRÁN																	
21- Moud*	36 19 N	43 00 E	222	7,0	1,7	-8,3	970	360	32,6	43,3	9-IV	227	2 380	23	0	-	BA'aa'
PACHISTAN																	
22- Quetta	35 10 N	67 03 E	1 073	3,6	2,8	-19,4	1 670	201	26,9	35	15-IV	179	1 280	38	4	-	AA'aa'
CHYPRE																	
23- Nicosia	35 08 N	33 17 E	215	10,0	5,6	-5,0	425	297	28,3	36,1	9-IV	236	1 990	45	0	-	EA'aa'
ARGENTINA																	
24- Constanza*	36 22 N	66 37 E	600	8,9	2,8	-5,0	1 010	364	25,6	32,8	30-IV	181	1 210	149	16	-	BB'aa'
TURNEZ																	
25- Dav	34 43 N	10 41 E	200	11,4	7,8	-3,9	280	126	26,2	30,8	24-III	251	1 890	70	12	-	EA'aa'
AUSTRALIA																	
26- Merburn	34 10 S	142 04 E	56	3,5	3,8	-	1 050	158	24,1	32,4	24-IX	212	1 210	104	20	-	DC'aa'
27- Wangi Wangi	35 07 S	147 27 E	187	8,5	2,6	-	1 309	310	24,8	33,4	9-X	201	1 250	210	36	-	CC'aa'

A. Índices agroclimáticos térmicos

1. Temperatura en el subperíodo de descanso

Para valorar y establecer jerarquías de la disponibilidad de enfriamiento invernal, no es posible utilizar la cantidad de horas de frío disponibles, pues es un índice agroclimático muy raramente informado pero se puede hacer uso de los dos valores térmicos climáticos con los cuales eran correlacionados: la temperatura mínima media o la temperatura media del mes más frío del año.

En la determinación de las áreas aptas para el cultivo en Australia, se tomó como límite la temperatura media de 5 °C para el mes de julio (Maggs, 1982), mientras que la temperatura media de 8,3°C en el mes más frío del año de Bakersfield, en el sur del estado de California, se considera límite para la implantación de la especie (Joley, 1969). Pensando en su aplicación a nivel mundial, parece adecuado fijar un límite térmico invernal algo superior a los señalados, al considerar la menor intensidad de la termosfase negativa en el Hemisferio Sur y la posibilidad de utilizar cultivares menos exigentes.

Para fijar un índice agroclimático sencillo que permita ordenar las regiones térmicas de descanso del pistachero con miras a obtener los tipos agroclimáticos de la especie, resulta adecuado utilizar la temperatura del mes más frío del año, cuya jerarquización y tipos de agroclima se consignaren en el cuadro XVII.2.

**Cuadro XVII.2.** Tipos de Agroclimas pistacheros jerarquizados según la disponibilidad de frío durante el subperíodo de descanso

**Cuadro XVII. 2.** Tipos de agroclimas pistacheros jerarquizados según la disponibilidad de frío durante el subperíodo de descanso.

Regiones térmicas invernales		
Zonas	Índice Agroclimático	
	Temperatura media del mes más frío del año (°C)	Tipo de agroclima
A	6,5 ó menos	óptimamente frío
B	6,6 - 7,5	suficientemente frío
C	7,6 - 8,5	moderadamente frío
D	8,6 - 9,5	poco frío
E	mayor de 9,5	sin frío

Las temperaturas invernales en aumento disminuyen la aptitud cultural a partir de la zona A (menos de 6,5 °C). La zona D con temperaturas para el mes más frío del año entre 8,6 y 9,5 es marginal y solo podrá intentarse un cultivo con portainjertos de menor exigencia en frío que P.vera, o mediante mejoramiento fitogenético o cultural.

## 2. *Temperatura en el subperíodo vegetativo*

El periodo de crecimiento activo se inicia con la floración masculina cuando la temperatura del aire es de 14°-15°C y finaliza con la maduración de los frutos y la caída de las hojas, aproximadamente con un nivel térmico similar, por lo cual es posible tomar a 15°C como temperatura base, y cuantificar la disponibilidad calórica usando como índice agroclimático as sumas de temperaturas efectivas sobre 15°C durante el bioperíodo de 15°C. En el cuadro XVII.1. se indica la disponibilidad calóricacalculada según este criterio, observándose clores muy altos que varían entre 1.000 y 2.300 °C aproximadamente.

Por lo analizado precedentemente, las sumas de temperaturas a la temperatura media del mes más caliente pueden ser índice agroclimáticos útiles para caracterizar las disponibilidades en duración e intensidad del verano en la delimitación de áreas que satisfagan los requerimientos calóricos del pistachero. Por razones de simplicidad, se eligió a la temperatura del mes más caliente, la que se ordenó en el Cuadro XVII.3 desde la zona A con temperaturas mayores de 26°C, comprendiendo a las áreas con mayor disponibilidad calórica regional, hasta E' con menos de 23 °C, temperatura considerada límite de maduración del pistachero, definiendo un agroclima inepto.

**Cuadro XVII.3.** Tipos de Agroclimas pistacheros jerarquizados según la disponibilidad durante el subperíodo vegetativo.

Regiones térmicas estivales		
Índice Agroclimático		
Zonas	Temperatura media del mes más caluroso del año (°C)	Tipo de agroclima
A'	26,0 - mayor	Óptimamente cálido
B'	25,9 - 25,0	suficientemente cálido
C'	24,9 - 24,0	moderadamente cálido
D'	23,9 - 23,0	poco cálido
E'	menor de 23,0	temperatura insuficiente

### 3. Riesgo de daño por heladas primaverales

La ocurrencia de heladas en la etapa de floración-brotación debe considerarse muy especialmente en aquellos regímenes asincrónicos, donde hay riesgo de daño, aun cuando la temperatura del aire supere los 15 °C. Para estos casos es conveniente establecer niveles de probabilidad de años con daños por heladas que tengan en cuenta el aspecto económico de la producción. Se estima que, como máximo, puede aceptarse, la pérdida de una cosecha cada cinco. El valor de -1°C en floración podrá ser el límite crítico, a considerar como resistencia a las temperaturas mínimas.

En el cuadro XVII.4. se establecen dos zonas en función la posibilidad de ocurrencia de heladas perjudiciales, considerando la del 20 % como separación entre las mismas. La zona a, será tanto más apta cuanto menor sea la probabilidad y, a la inversa, el fracaso económico del cultivo será tanto mayor cuanto más supere el 20 % la probabilidad de ocurrencia de heladas en floración.

**Cuadro XVII.4.** Tipos de Agroclimas pistacheros clasificados según el riesgo de daños por heladas en floración

Regiones térmicas perjudiciales		
Índice Agroclimático		
Zonas	Probabilidad de heladas en la floración (comienzo del bioperíodo de 15 °C)	Tipo de agroclima
a	P menor del 20%	sin heladas perjudiciales
b	P mayor del 20%	con heladas perjudiciales

## B. Índices agroclimáticos hídricos

### *Lluvias durante la maduración de los frutos*

Al no disponer de un parámetro hídrico de mayor significación para valorar la aptitud agroclimática regional relacionada con la maduración, pareció adecuado considerar como índice agroclimático la cantidad de lluvia en el mes final de la maduración, con los límites empíricos indicados en el cuadro XVII.5.

**Cuadro XVII.5.** Tipos de Agroclimas pistacheros según las condiciones de humedad en la maduración

Regiones pluviométricas		
Zonas	Índice Agroclimático	
	mm de lluvia en el mes final de la maduración	Tipo de agroclima
a'	menos de 25	de lluvia adecuada
b'	más de 25	de lluvia excesiva

Para poder ubicar zonas de posible utilización en el Hemisferio Sur, se han establecido valores de precipitación algo mayores a los que se registran como favorables en el Hemisferio Norte. La cantidad de 25 mm es provisoria, pues habría que considerar el tipo de precipitación y especialmente el número de días con lluvias, si van acompañadas con persistencia de aire húmedo, etc.

### *Tipos agroclimático mundiales*

La zonificación desarrollada mediante el procedimiento propuesto por Burgos (1968), permite combinar las regiones climáticas térmicas e hídricas jerarquizadas según las exigencias y tolerancias bioclimáticas del pistachero. Tal combinación de zonas califica la aptitud agroclimática regional para el cumplimiento de los requerimientos de la especie durante su ciclo ontogénico.

Dados que las disponibilidades térmicas en ambas termino fases del termoperiodo anual son los indicadores principales de la aptitud del clima para el cumplimiento del ciclo biológico y de productividad de la especie, la valoración realizada en los cuadros XVII.2 y XVII.3., indica que los agroclimas AA' con la mayor amplitud térmica anual son los más aptos, disminuyendo la aptitud a medida que en la fórmula del agroclima aparecen niveles

térmicos invernales o estivales menos favorables. La aparición de los tipos EE' en la combinación agroclimática, genera un agroclima no apto por deficiencia térmica en ambas termofases.

De acuerdo a este criterio valorativo, en el cuadro XVII.6 se clasifica la aptitud térmica regional de las áreas mundiales de cultivo del pistachero (*Pistacia vera*, L.)

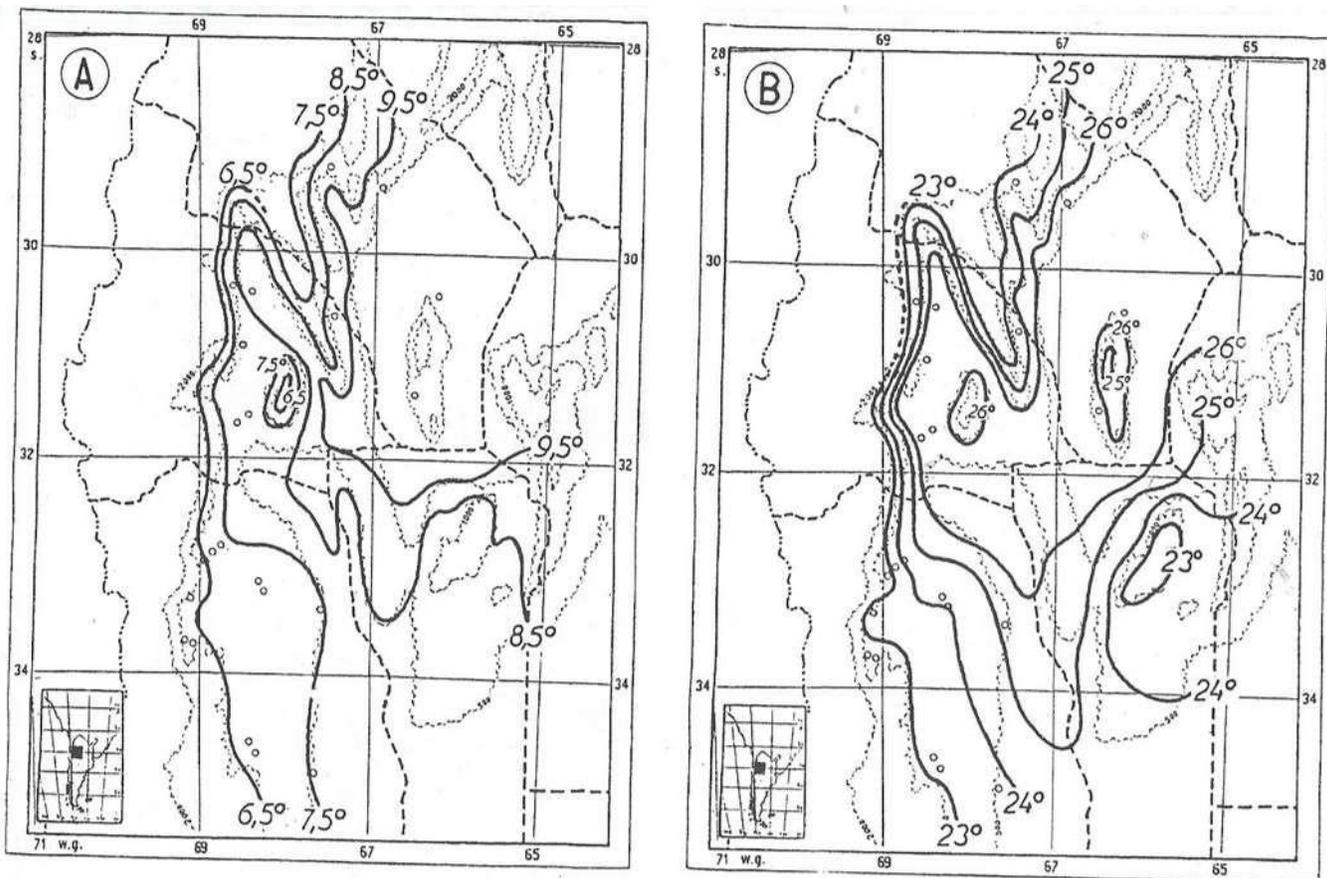
**Cuadro XVII.6.** Los tipos agroclimáticos térmicos del pistachero (*Pistacia vera*, L.) clasificados según su aptitud.

Tipo Agroclimático	Aptitud
AA' - AB' - BA'	Muy Buena
AC' - BB' - CA' CA' - CB' - CC'	Buena
AD' - BD' - CD' DA' - DB' - DC' - DD'	Reducida
EA' - EB' - EC' ED' - EE' - EA' BE' - CE' - DE'	No aptos

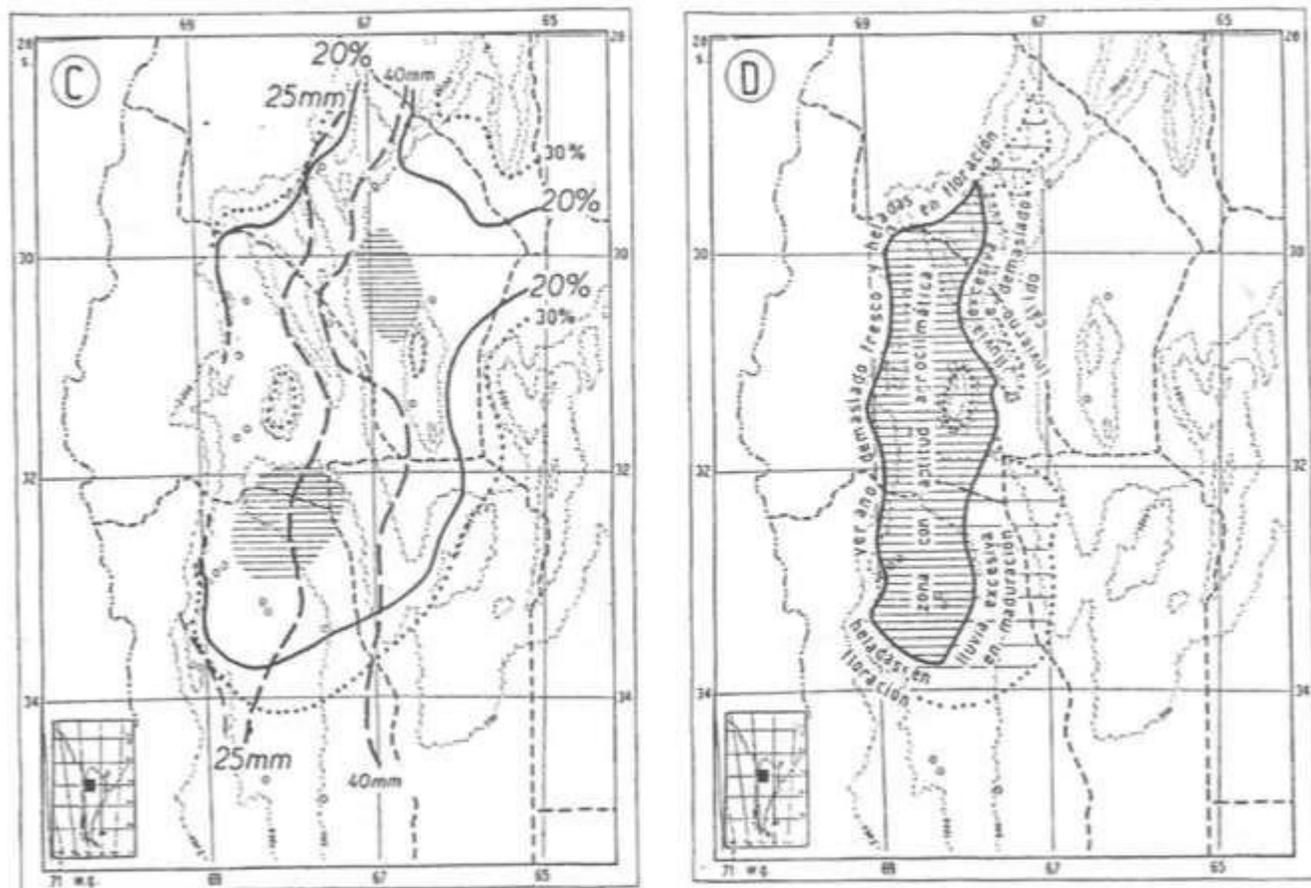
La fórmula del tipo agroclimático se completa con la participación de los índices de peligrosidad de temperaturas mínimas perjudiciales al comienzo del periodo vegetativo y los de incidencia de la humedad en el proceso de la maduración. Naturalmente, los agroclimas que incluyen las zonas **a** y **a'** manifiestan toda su aptitud de acuerdo con la participación fundamental de las temperaturas de invierno y del verano, mientras que las que integran algunas o ambas letras **b** y **b'** pasan a ser marginales con restricciones, o ineptas, según el alejamiento de los valores establecidos como límites a saber: más de 20 % de probabilidad de heladas y/ o más de 25 mm de precipitación en el mes de la maduración.

#### ***Tipos agroclimáticos para el cultivo del pistacho en la Argentina***

Las cuatro cartas de la figura XVII.1 ilustran la región de la Argentina con aptitud agroclimática para el cultivo del pistachero. Corresponde a la región precordillerana centro-occidental, con alturas entre 500-1.500 m, comprendiendo parte de las provincias de San Juan, Mendoza, San Luis y La Rioja, territorio caracterizado por tener la mayor amplitud térmica anual en el país. Las cartas A y B muestran el trazado las isotermas de los meses más frío y más caliente, respectivamente, siguiendo las escalas preestablecidas.



**Figura XVII.1:** Valores agroclimáticos seleccionados como índices para el cultivo de pistachero. A) Temperatura media del mes más frío del año. B) Temperatura media del mes más caluroso.



**Figura XVII.1:** (Cont) Porcentajes de años con heladas en la floración. Línea entera 20%; línea punteada: 30%; área rayada: 10% o menos) e isohietas de 25 y 40 mm. En el mes final de maduración (línea cortada): D. Área con aptitud Agroclimática favorable (rayado denso); restricciones, limitantes y áreas marginales (rayado espaciado).

La carta C delimita la región donde la probabilidad de heladas en floración sería inferior al 20% de los años. Para el trazado de este parámetro de heladas se ha utilizado las cartas de comienzo del bioperíodo de 15°C y la fecha media de últimas heladas perjudiciales, calculándose el porcentaje probable de ocurrencia de heladas en floración, según una desviación típica estimada de +20 días para el último parámetro. Como información, se señala con punteado el área donde la probabilidad de daños por heladas en floración alcanzaría hasta el 30% de los años, lo que supone una pérdida probable aproximada de una cosecha cada tres, y con rayado, aquellas zonas dentro del área favorable, donde la pérdida a esperar sería menor de 1 cada 10 cosechas ( $p < 0.10$ ). En la misma carta se trazan las isohietas de 25 mm y 40 mm en el mes final de maduración. Este último valor sería el límite extremo de áreas marginales con restricciones, estimando que en la Argentina el mes final de maduración se extendería desde mediados de febrero a mediados de marzo.

**Cuadro XVII.7.** Aptitud de los tipos agroclimáticos existentes en la Argentina para el cultivo del pistachero.

Aptitud Agroclimática		
Buena	Reducida	Marginal
BC' aa'	BD' aa'	Ac'ba' BD'ab' CB'ab'
CA' aa'	CD' aa'	AD'ba' BD'bb' CD'ab'
CB' aa'	DA' aa'	BB'ba' BD'ba' DA'ab'
CC' aa'	DB' aa'	BC'ba' CA'ab' DB'ab'
		BC'bb' CB'bb' DC'ab'

La carta D acota la región apta según las cuatro limitantes agrícolas expuestas y las regiones consideradas marginales con restricciones por heladas o lluvias excesivas.

Dentro de la región con condiciones favorables para el pistachero, se encuentran los distintos tipos agroclimáticos que pueden valorarse en su aptitud, de acuerdo con la escala del cuadro XVII.7., en el cual se incluye la categoría del marginal teniendo en cuenta la incidencia de alguna de las limitantes, por heladas o por exceso de lluvias, siempre y cuando no exceda el 30% de probabilidad en el primer caso y/o de 40 mm en el segundo.

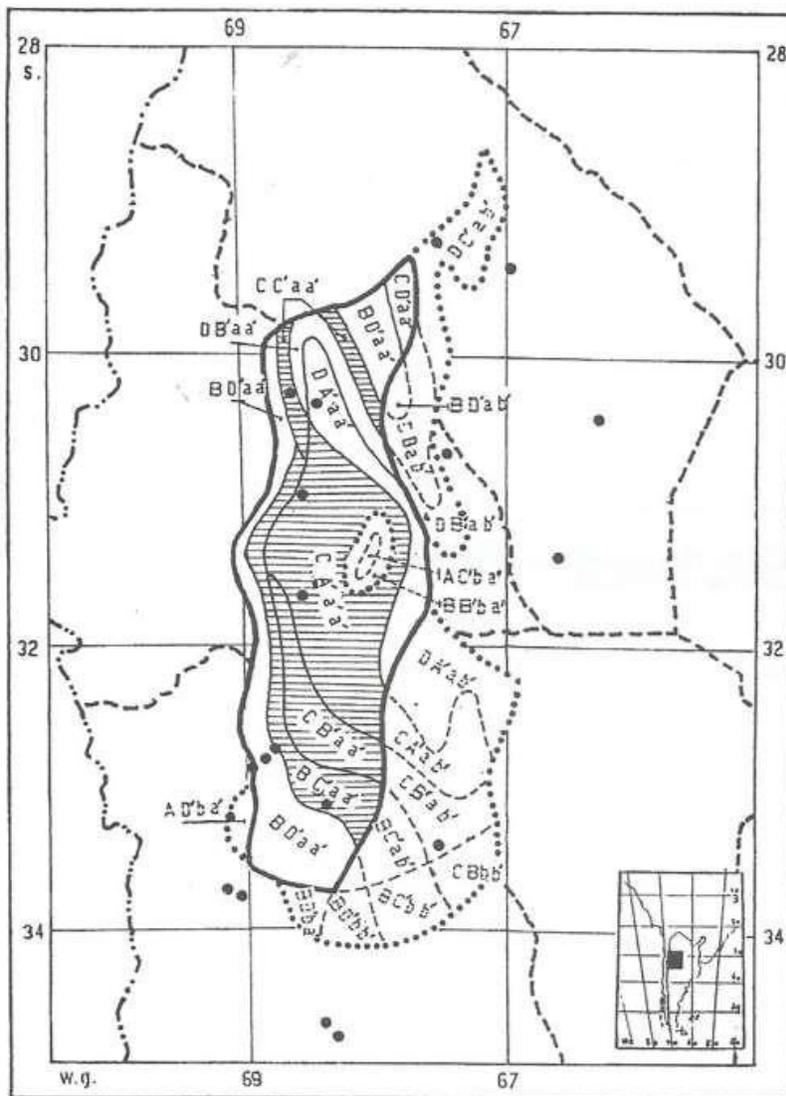
En el cuadro XVII.8 se consignan los datos agroclimáticos calculados con la información de las estaciones agroclimatológicas ubicadas dentro o en la periferia de la región analizada, con la clasificación en tipos según las escalas propuestas.

Si se comparan los tipos agroclimáticos argentino con los de otras regiones mundiales de cultivo, puede establecerse que dentro de las áreas argentinas calificadas como buenas existen agroclimas térmicamente homólogos con extranjeros.

Finalmente la carta de la figura XVII.2 muestra la ubicación y extensión de las áreas buenas, reducidas y marginales para el cultivo del pistachero en la Argentina.

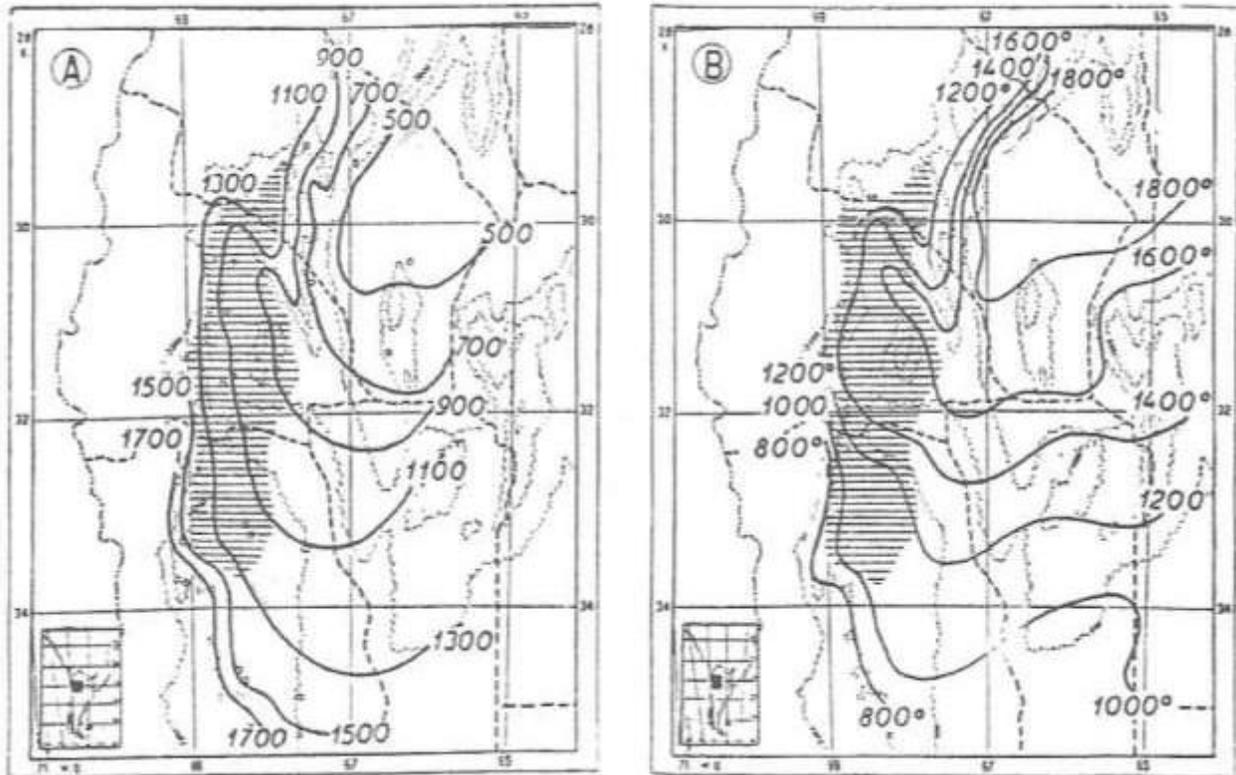
**Cuadro XVII.8.** Valores Agroclimáticos y tipo de agroclimas de algunas localidades ubicadas en la región de posible cultivo en la Argentina y en la periferia.

Provincias y localidades	Ubicación y altitud			Periodo	Subperiodo de descanso					Subperiodo vegetativo							Tipo de agroclima	
	Lat. S	Long. o	Alt. s.n.m.		Temperatura			Horas de frío	Precipitación	Temperatura mes más caluroso		Bioperíodo de 15 °C			Precip.			Fecha media de última helada
					media	mínima	absol. año			media	máxima	Fecha de comienzo	Dura-ción	Suma de temp.	Total	mes de mad.		
<b>MENDOZA</b>																		
1- San Carlos	33 46	69 02	940	1941-80	4,8	-2,8	-14,0	2.340	84	20,8	29,8	22-X	155	580	208	34	5-X	AE'ba'
2- Ch. de Cona	32 58	68 62	921	1961-80	6,0	0,2	-6,7	1.450	46	22,4	29,0	17-X	177	790	160	27	22-IX	AE'bb'
3- D. Sardina	33 18	69 12	750	1961-70	6,1	-1,1	-13,7	1.480	36	23,9	31,2	8-X	191	1.090	140	25	24-IX	AD'ba'
4- La Comoula	33 44	69 07	940	1961-80	6,5	-0,3	-6,5	2.150	68	22,1	29,5	16-X	169	730	189	40	1-X	AE'bb'
5- Rama Calda	34 40	68 23	690	1961-80	7,0	0,3	-9,8	1.510	77	23,2	30,8	7-X	180	800	251	42	24-IX	BD'bb'
6- San Martín	33 05	68 25	653	1961-80	7,0	1,2	-9,4	1.180	37	24,0	32,4	30-IX	194	1.090	146	25	3-IX	BC'aa'
7- Junco	33 09	68 28	653	1971-80	7,2	1,0	8,0	1.200	36	24,1	32,1	26-IX	200	1.100	168	34	1-IX	BC'aa'
8- San Rafael	34 35	68 24	748	1951-70	7,2	1,0	-6,7	1.480	100	23,2	31,0	9-X	185	960	222	30	20-IX	BC'aa'
9- El Plumero	32 50	68 47	700	1941-80	7,3	0,8	-7,8	1.350	51	24,8	32,3	30-IX	227	1.180	120	18	5-IX	BC'aa'
10- Mendoza	32 53	68 51	827	1941-80	7,5	3,4	-6,8	1.400	89	23,8	30,2	4-X	191	1.060	146	22	8-IX	BD'aa'
11- Cma. Alvear	35 00	67 39	465	1941-80	7,6	0,7	-10,6	1.430	87	23,8	32,8	5-X	194	1.000	275	46	23-IX	CD'bb'
12- La Paz	33 28	67 03	506	1941-60	7,7	-0,1	-10,6	1.130	62	25,5	34,4	27-IX	206	1.310	194	30	2-IX	BD'bb'
<b>SAN JUAN</b>																		
13- San Juan Aero	31 34	68 25	598	1961-80	7,6	0,0	-0,2	1.100	12	26,6	34,5	17-IX	220	1.550	71	10	23-VIII	CA'aa'
14- El Balde	30 57	68 38	928	1966-80	7,8	-2,1	-12,6	1.100	9	26,5	33,4	20-IX	215	1.480	70	9	24-VIII	CA'aa'
15- San Juan	31 37	68 32	630	1941-80	8,0	1,6	-8,0	1.150	31	26,2	34,0	16-IX	222	1.500	75	13	21-VIII	CA'aa'
16- Jachal	30 15	68 45	1.160	1941-80	8,5	0,2	-8,8	1.150	24	24,8	32,2	27-IX	300	1.190	109	19	1-IX	CC'aa'
17- San Martín	31 36	68 28	598	1961-80	8,6	0,4	-8,4	1.080	30	26,1	33,7	19-IX	220	1.510	82	22	25-VIII	DA'aa'
18- Valle Fértil	30 36	67 27	857	1961-80	9,2	2,8	-6,4	680	27	24,6	32,2	18-IX	222	1.280	300	44	20-VIII	DC'bb'
<b>A RIOJA</b>																		
19- Chilecito	29 10	67 30	1.101	1941-70	8,7	2,2	-9,0	950	26	24,5	32,8	17-IX	231	1.280	166	30	22-VIII	DC'ab'
20- Chapes	31 20	65 35	654	1941-80	10,3	4,1	-9,5	660	64	26,4	32,9	6-IX	247	1.730	294	45	10-VIII	EA'ab'
1- La Rioja	29 33	66 49	430	1941-80	10,9	4,2	-9,3	480	48	27,5	35,4	25-VIII	265	2.150	28	53	28-VII	EA'ab'
2- Chicalil	30 22	66 17	461	1963-80	11,8	5,5	-7,4	430	58	26,2	33,1	27-VIII	267	1.160	409	67	1-VIII	EA'ab'



**Figura XVII.2.** Tipos agroclimáticos de las áreas de aptitud buena (rayada), reducida (línea llena) y marginales (línea cortada) para el cultivo del pistachero en la Argentina.

Para completar la información regional sobre las disponibilidades locales de enfriamiento invernal y de calor estival, las cartas de la figura XVII.3 muestran la cantidad de horas de frío durante el descanso y las sumas térmicas mayores de 15 °C en el bioperíodo vegetativo del pistachero.



**Figura XVII.3.** A Horas de frío acumuladas en el subperíodo de descanso y B Suma de temperaturas efectivas sobre 15° C totalizadas en el subperíodo vegetativo del pistachero

Resumiendo, en la determinación de la posible incorporación del pistachero (*P. vera*) a la agricultura argentina, se comprueba que el principal inconveniente es de orden climático, por la reducida amplitud anual disponible.

De allí que no existan analogías con agroclimas mundiales de reconocida aptitud pistachera. Además el área argentina térmicamente más adecuada se ve reducida por factores restrictivos de heladas en la floración y/o de lluvia en la maduración. El reducido monto de la precipitación anual del área con aptitud favorable se concentra en el semestre cálido y de alto nivel de evapotranspiración, mientras que el invierno totalmente seco impone obligatoriamente la necesidad de recurrir al riego para la implantación y posterior atención de los montes.

Para encarar el cultivo del pistachero sería necesario adoptar medidas culturales adecuadas, como utilización de cultivares adaptados a la escasa disponibilidad de frío invernal, la injertación sobre *P. terebinthus* o *P. atlántica* y la utilización de polinizadores de floración tardía. Estas y otras prácticas tecnológicas deberían confirmarse con la experimentación previa. Se tiene conocimiento de que una empresa ha iniciado la venta de plantas en la región de Cuyo con la finalidad de destinar tierras para el cultivo del pistachero acorde a la información provista por este estudio.



## 18. CLIMA ARGENTINO

### 18.1 INTRODUCCIÓN

Se puede definir el clima como el conjunto de los fenómenos que caracterizan el **estado medio** de la atmósfera y proceso ordinario del tiempo en un lugar determinado o región. Por lo general se promedian las distintas variables sobre un período de 30 años, hablando en ese caso del clima normal, aunque a veces se trabaje con una década determinada, o períodos mucho más largos de tiempo.

Antiguamente se consideraba que el clima era estable y no se modificaba con el tiempo, sin embargo ya hace varios años que se sabe que los climas se han ido modificando por diferentes motivos, generando lo que se llama variabilidad y cambio climático, temas que desarrollaremos más adelante.

El clima de un lugar queda determinado por el efecto a largo plazo de diferentes factores. En primer lugar por la radiación solar interceptada por la superficie terrestre, condicionada por el eje de rotación de la tierra y su forma esférica, que sufre variaciones en función de la latitud del lugar o región. En segundo lugar la circulación general de la atmósfera determinará la dirección de los vientos, constituyendo un factor fundamental en la formación de los climas, como así también la distribución de continentes y océanos, las corrientes marinas y el relieve.

### 18.2 EL CLIMA DE ARGENTINA

El clima en Argentina va a estar condicionado principalmente por los siguientes factores:

✓ Latitud

El territorio continental Argentino se extiende desde latitudes tropicales hasta regiones subpolares como Tierra del Fuego (desde 21° 46´ hasta 55° 58´ S de latitud) (Figura 1), determinando grandes diferencias en la cantidad de radiación solar recibida. En el solsticio de verano el Norte de nuestro país recibe aproximadamente 990 Ly/día, mientras que en el sur llegan 1035 Ly/día, con un máximo de 1045 Ly/día a los 40° de latitud. En el solsticio de invierno la radiación recibida disminuye progresivamente hacia el Sur, con 570 Ly/día en el Norte y 170 Ly/día en el Sur.

Esta variación latitudinal provoca también que la duración astronómica del día oscile en diciembre desde 13 h 18´ en el Norte a 17h 21´ en el Sur del país. En la estación invernal la duración del día disminuye con la latitud siendo de 10 hs 39´ en el extremo norte del país a 6hs 53´ en el sur, anulándose en el Círculo Polar Antártico. Si tenemos en cuenta las duraciones de los días en verano e invierno, vemos que el norte con respecto al sur, tiene menor amplitud en ambos solsticios.

Por lo tanto, la latitud de un lugar condicionará la cantidad de radiación solar recibida y también la duración del día, siendo este el principal factor que determina las características del clima en una región.

✓ Circulación atmosférica

La circulación atmosférica sobre el extremo sur del continente americano está controlada por tres características que se observan en la distribución de la presión media al nivel del mar (figura 2): los anticiclones semi-permanentes ubicados a ambos lados del

continente en los océanos adyacentes, el sistema de baja presión conocido como la “depresión del Noroeste Argentino” (DNOA) y, más al sur, el cinturón de vientos del oeste.

Al norte de 40°S, los sistemas de circulación asociados a los anticiclones del Pacífico Sur y del Atlántico Sur se hallan prácticamente aislados entre sí por la presencia de la cordillera de los Andes. El noroeste de Argentina y sur de Bolivia la mayor parte del tiempo esta dominada por la DNOA, un sistema de baja presión de características termo-orográficas. Este sistema, por originarse debido al calentamiento de superficie resulta más intenso en verano. Esta configuración de los sistemas de presión (figura 2) determina que los vientos predominantes den la Argentina subtropical provengan de las direcciones N y NE. La humedad que ingresa al territorio argentino en estas latitudes proviene entonces de dos fuentes principales: el océano Atlántico y la selva tropical amazónica, pues el ingreso de humedad desde el océano Pacífico se halla limitado por la presencia de los Andes.

Más al sur, entre 40 y 60°S, los vientos del oeste predominan durante todo el año. El cinturón de vientos del oeste rodea el globo en estas latitudes, ocupadas casi exclusivamente por los océanos australes, siendo el continente sudamericano la única porción de tierra firme que se interpone en su trayectoria. Los vientos del oeste ingresan al continente masas de aire cargadas de humedad en el Pacífico, pero el ascenso forzado a sotavento de la cordillera hace que la descarguen mediante copiosas precipitaciones sobre el territorio chileno. Como en esas latitudes la cordillera presenta menor altura, hay algunas localidades argentinas (las más occidentales de la región) con regímenes de precipitación similares a los del sur de Chile.



Figura 18.1: Extensión latitudinal y altitudes de Argentina.

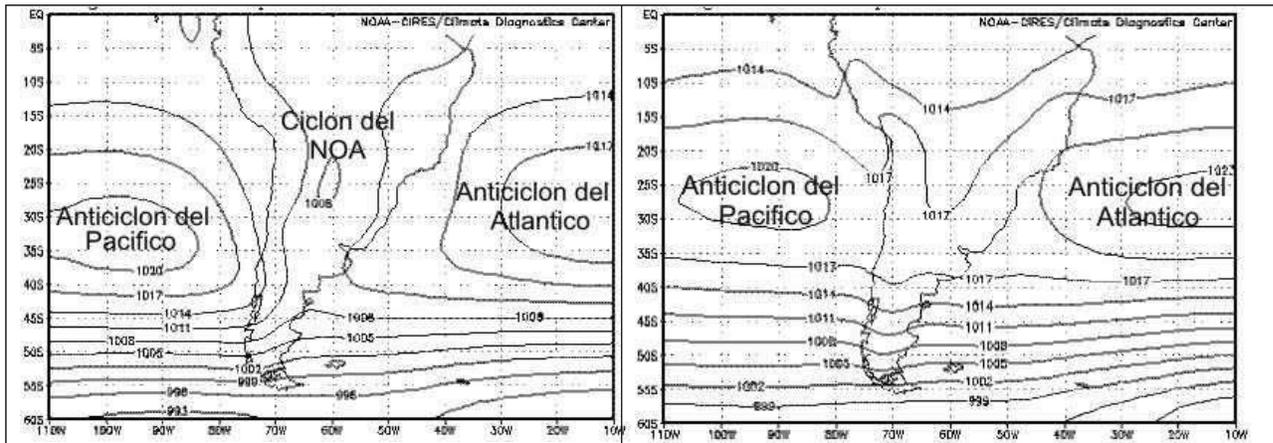


Figura 18.2: Distribución de la presión media al nivel del mar en enero y julio (izquierda y derecha respectivamente).

- ✓ Distribución de océanos y continentes. Corrientes marinas.

Otro factor de fundamental importancia es la cercanía al mar, u oceanidad, que atenúa el efecto de la latitud sobre la amplitud térmica. La capacidad de retención de calor (capacidad calorífica) del agua produce un efecto moderador sobre la temperatura, determinando que en localidades costeras o muy húmedas los veranos sean más frescos y los inviernos más cálidos que tierra adentro. La República Argentina esta ubicada en el Hemisferio Sur donde la masa oceánica es mayor que la continental a diferencia del Hemisferio Norte donde ocurre lo contrario, esto hace que los climas tengan temperaturas más moderadas tanto en verano como en invierno.

Sobre la costa chilena y cerca de la costa Argentina corren dos corrientes marinas frías, de Sur a Norte, la corriente de Humboldt y la corriente de Malvinas. La corriente cálida de Brasil corre de Norte a Sur en el Océano Atlántico tropical sobre las costas de Brasil y Uruguay, llegando hasta el Río de la Plata y siguiendo la trayectoria del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur.

- ✓ Relieve

Otro factor importante en el clima Argentino es el relieve. El mayor accidente orográfico lo constituye la Cordillera de los Andes, que se extienden de norte a sur en el oeste argentino, condicionando a la circulación de masas de aire. Desde el norte del país hasta aproximadamente el paralelo 40°, la altura de la Cordillera promedia los 6000 m. El resto del país esta mayormente constituido por llanuras y planicies.

## 18.3 ANALISIS DE LAS PRINCIPALES VARIABLES METEOROLOGICAS

### 18.3.1 Viento

Las condiciones medias del viento están controladas por tres sistemas de circulación principales: las altas subtropicales, la intensidad del centro de baja presión continental y los oestes de latitudes medias.

Según los campos de presión podemos analizar como será el viento. Es interesante notar el flujo predominante del oeste desde 35°S de latitud hacia el sur, en la mayor parte del

año. Existe una zona de transición al Norte de la región Patagónica donde predomina el flujo del oeste en invierno y el flujo norte-sur en verano.

Al Norte de 37°S de latitud, la altura de la cordillera aumenta abruptamente y el continente se ensancha. Esto hace que disminuyan los vientos del oeste en esta región. Además la existencia del centro de baja presión, más intenso en verano hace que el viento sea del sector sur en el lado oeste de la baja y del sector norte en el lado este. Al este del centro de baja presión los vientos dependen principalmente de la posición e intensidad del anticiclón del Atlántico sur. Por lo tanto el desplazamiento del Anticiclón hacia el norte en invierno hace que los vientos del este también se desplacen al norte.

### 18.3.2 Temperatura

En Argentina la distribución de isotermas esta dominada principalmente por la influencia del océano y la variación de la latitud.

Las temperaturas anuales más altas se observan en el norte del país, de tal forma que la isoterma de 20°C aparece recién en 30°S de latitud. Al sur de 30°S la variación de la temperatura anual se hace más importante y en 35° se empieza a notar con claridad la influencia del mar, donde aparece una inclinación de las isotermas del noroeste al sudeste. Al llegar a la Patagonia esto varía debido a la elevación del terreno. Las temperaturas medias anuales más bajas se registran en el extremo sur de la Patagonia y en Tierra del fuego con valores de 5-6°C.

Sobre los 35° de latitud que abarca la Argentina (desde 20 a 55°S) la variación de la temperatura anual es de alrededor de 21°C. La magnitud de esta variación permanece prácticamente constante a lo largo de todo el año, ya que tanto en el extremo sur como norte del país la variación anual de temperatura media es de un rango de 8°C.

Las temperaturas medias mensuales más altas se encuentran en el noreste del país. En el verano esta es la región más cálida, aunque de todas formas no son tan altas como en América de Norte o en otros continentes a la misma latitud. La zona cálida del noreste del país alcanza temperaturas medias mensuales de hasta 28°C. Debido a la continentalidad del clima, temperaturas medias en enero de más de 24°C son habituales en Cuyo y en la región central de Argentina. La influencia continental puede identificarse también en la meseta patagónica.

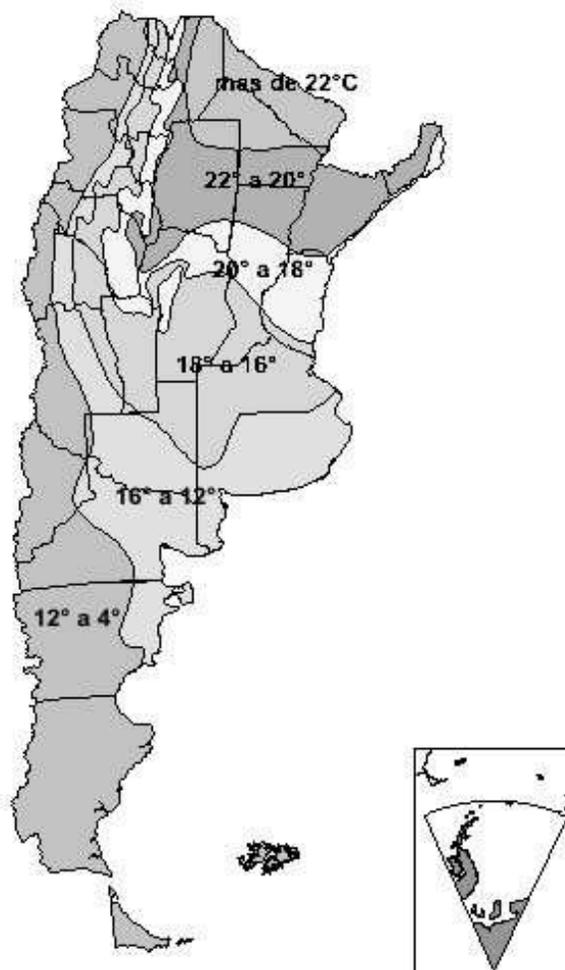


Figura 18.3: Temperaturas anuales de la Argentina

Debido a los vientos predominantes del oeste, la influencia de la corriente fría de Malvinas no resulta significativa. Por el contrario la influencia oceánica afecta completamente la provincia de Buenos Aires, y el sur de Entre Ríos. La influencia más fuerte del océano se observa en Tierra del Fuego donde las temperaturas de 9-10°C son apenas superiores a las del mar que la rodea.

Toda la Argentina tiene una simple variación de temperatura anual, con un máximo en enero y un mínimo en julio, mientras que a lo largo de la costa los extremos se desplazan a febrero y agosto. Igualmente las diferencias de temperatura entre junio y julio en el continente y entre julio y agosto en la costa son muy chicas. Llama la atención la similitud en la variación anual en climas tan diferentes. Por un lado la influencia de la latitud en la variación anual es muy chica mientras que la influencia marítima o continental se distingue claramente.

En la Patagonia se evidencia la influencia continental en el régimen de temperaturas hasta prácticamente la costa. La zona de influencia marítima es mínima en esta región. La influencia marítima es más importante en los subtropicos pero tampoco tiene una gran penetración en el continente.

En general en el centro de Argentina las temperaturas son apenas más altas en primavera que en otoño, esto tiene que ver con que en otoño hay mayor nubosidad. En cambio en las zonas influenciadas por el mar en otoño las temperaturas son más altas que en primavera. En el noroeste argentino la temperatura aumenta de julio a noviembre, luego queda constante hasta marzo y comienza a disminuir hasta junio. Es decir que el noroeste comparte un clima tropical en verano debido a la fuerte advección de masas de aire tropical y el resto del año forma parte de los climas de los subtrópicos secos, con una variación de temperatura exclusivamente relacionada con la variación de la radiación solar.

La variación anual de temperatura más importante se observa en el oeste entre 30 y 40°S de latitud. Es decir que la máxima continentalidad se da en esta región donde el continente es lo suficientemente ancho y los Andes protegen la región de la influencia marítima y sirven de canal para la llegada de masas de aire tropical en verano y polar en invierno.

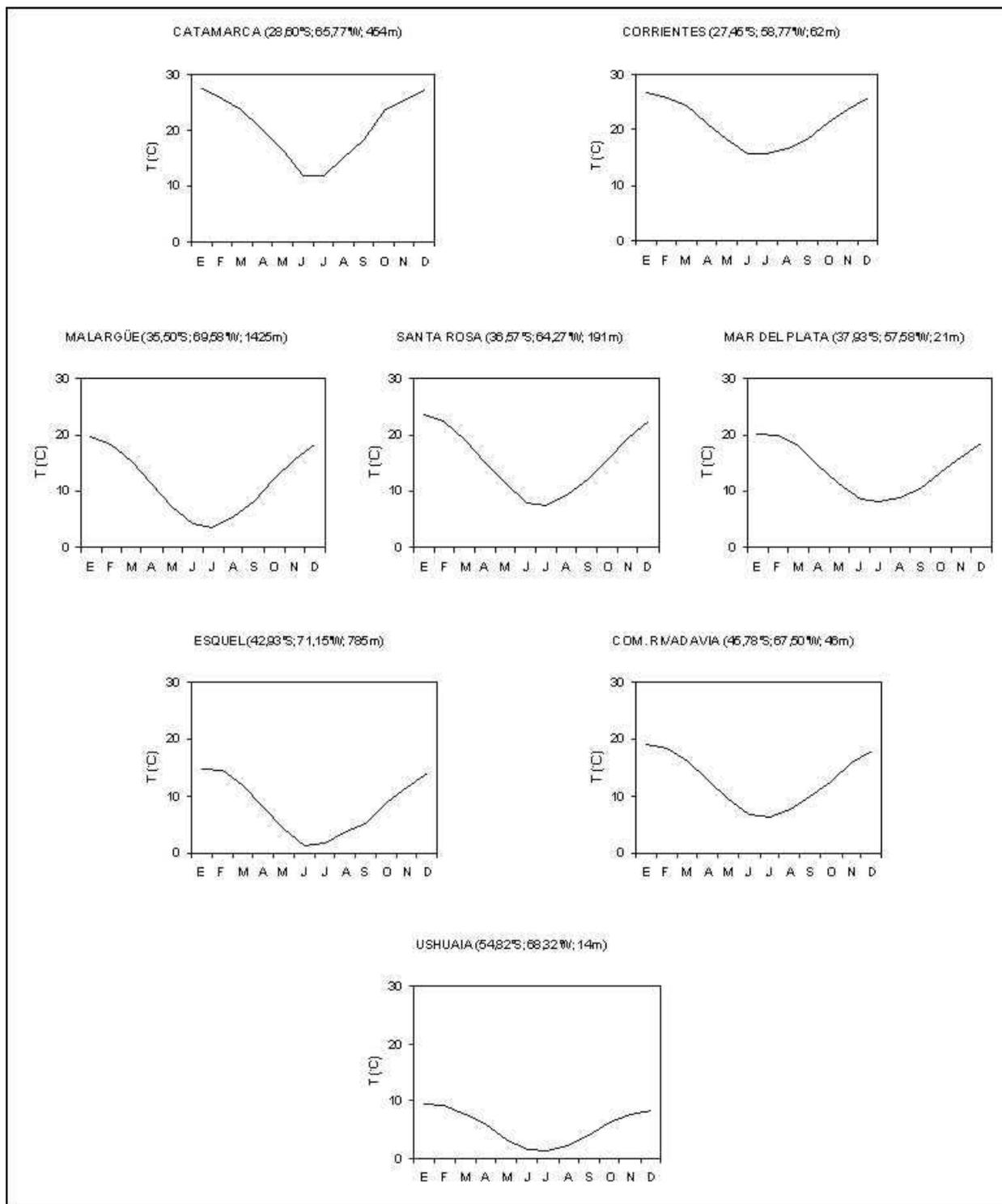


Figura 18.4: Marcha de la temperatura media del aire, para varias localidades Argentina.

En la figura 4 se muestran las marchas anuales de temperatura de diferentes localidades de Argentina, donde se distingue claramente el efecto de la cercanía al mar y también de la latitud.

Dado que la diferencia entre la cantidad de radiación recibida en verano e invierno en el Sur del país es mucho mayor que en el norte se debería observar una mayor amplitud térmica. Esta diferencia en la amplitud térmica se ve atenuada por el efecto moderador del océano. Se puede observar comparando las marchas anuales de temperatura de Catamarca y Corrientes que se encuentran aproximadamente en la misma latitud como Catamarca presenta una mayor amplitud térmica dado que el clima es más continental. Estas mismas diferencias se pueden ver comparando los gráficos para Santa Rosa y Mar del Plata. Malargüe que se encuentra a una mayor altura sobre el nivel del mar presenta temperaturas mensuales más bajas durante todo el año, lo mismo se puede observar entre Esquel, cuya altura es de 795m, y Comodoro Rivadavia. Por último la marcha anual de Ushuaia esta completamente influida por la cercanía al mar, mostrando la menor amplitud térmica, por otro lado por ser la localidad de mayor latitud presenta los menores valores de temperaturas mensuales.

### 18.3.3 Humedad

La humedad en Argentina proviene principalmente de las regiones tropicales de Brasil, del océano Atlántico y de la zona de la Mesopotamia (Misiones, Corrientes, Entre Ríos). La humedad proveniente del Pacífico esta casi totalmente bloqueada por la cordillera de los Andes y las masas de aire provenientes de regiones polares tienen muy escaso contenido de humedad.

Existe una disminución de la humedad de norte a sur y también de este a oeste. Los valores de humedad medios anuales decrecen desde el noreste al sudoeste. En la Patagonia donde las masas de aire tropicales y húmedas no penetran normalmente la disminución de humedad es casi estrictamente de este a oeste.

La única excepción donde la humedad no disminuye hacia el oeste es en la zona de las sierras de Tucumán y en el este de Salta y Jujuy, donde como resultado de las lluvias orográficas se observa una selva tropical o sub-tropical.

En invierno la principal fuente de humedad es el océano Atlántico y la zona de la Mesopotamia, en cambio en verano predomina el ingreso de masas de aire tropical provenientes de Brasil.

Según el comportamiento estacional se podría dividir el país en tres regímenes:

1. La región noreste y centro-este que tiene una importante advección de humedad durante todo el año.
2. La región Patagónica donde la humedad es escasa durante todo el año
3. La región del noroeste donde la principal fuente de humedad son las masas de aire tropicales en verano y el invierno es muy seco.

### 18.3.4 Precipitación

Las dos terceras partes de la Argentina pertenecen a la región seca del continente. Solamente el noreste y centro-este del país presentan un clima más lluvioso.

AL norte de 30°S de latitud las lluvias disminuyen de este a oeste y al sur de 40°S disminuyen de oeste a este, entre 30 y 40°S la precipitación disminuye muy rápidamente desde la cordillera hacia el centro del continente y vuelve a aumentar muy lentamente

hacia la costa atlántica. Una franja angosta con intensas lluvias orográficas se extiende desde el este de Tucumán hacia el norte. Un efecto costero en la lluvia se encuentra en el norte y sur de la Patagonia, mientras que en el centro de la región las lluvias en la costa son tan escasas como en el continente.

Los valores anuales más altos se observan en la cordillera sur entre 40 y 45°S, y en Misiones con valores de 1800mm. En una región limitada del noroeste de Argentina se encuentran valores superiores a 2000mm en la zona de lluvias orográficas. La zona más seca es la del oeste de la región noroeste y se extiende a La Rioja, Catamarca y San Juan donde la precipitación anual es menor a 100mm. La región seca se desplaza progresivamente hacia el este y domina la zona central de la Patagonia.

La distribución de las precipitaciones a lo largo del año depende principalmente de las masas de aire que prevalecen. En invierno se produce una intensa precipitación en la cordillera patagónica. También se pueden producir lluvias intensas en el noreste del país. En verano cuando prevalece la circulación norte-sur, las masas de aire que producen la precipitación tienen origen en zonas tropicales.

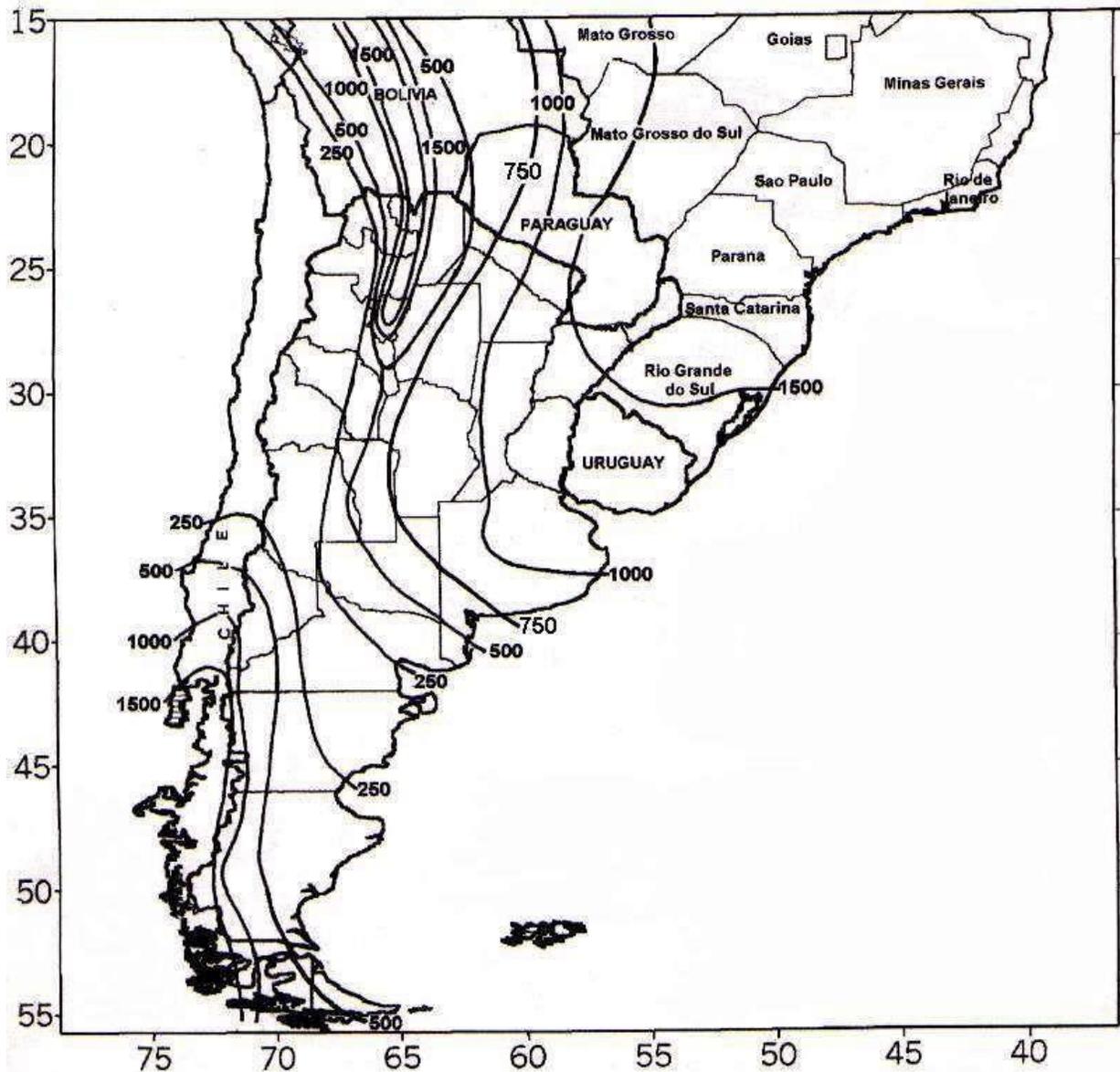


Figura 18.6: Precipitación media anual del periodo 1971-2000.

### 18.3.5 Regímenes de precipitación

Como se mencionó anteriormente los regímenes de precipitación se pueden clasificar en mediterráneo, monzónico e isohigro, considerando el porcentaje de precipitación del semestre cálido o del semestre frío respecto a la precipitación anual. En la figura 7 se presenta un mapa donde se muestra el porcentaje de precipitaciones del semestre cálido con respecto a la precipitación anual. Se puede ver que en el Noroeste el régimen es Monzónico, mientras que en el resto del país es isohigro excepto en el Oeste de Río Negro y Chubut, y en el Sur de Neuquén donde el régimen es mediterráneo.

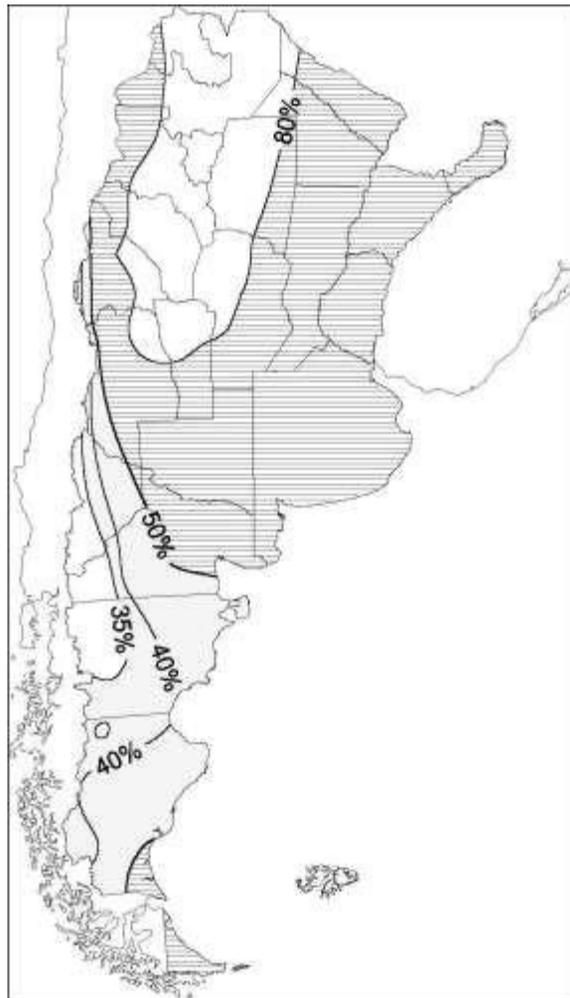


Figura 18.7: Estacionalidad de la precipitaciones en la Argentina. Los valores indican la el porcentaje de precipitación en el semestre cálido (Oct-Marz).

#### 18.4 BIBLIOGRAFÍA:

SCHWERDTFEGER, W. World Survey of Climatology, Vol. 12: Climates of Central and South America. Elsevier, 1976.

**19. CAMBIO Y VARIABILIDAD DEL CLIMA**

La Tierra absorbe la radiación del Sol, sobre todo en la superficie. Esta energía es redistribuida luego por las circulaciones atmosférica y oceánica, y es irradiada nuevamente al espacio en longitudes de onda más largas (infrarrojas). Para la media anual y para la Tierra en su conjunto, la energía de la radiación solar que ingresa se equilibra aproximadamente con la radiación terrestre saliente. Cualquier factor que altere la radiación recibida del Sol o perdida en el espacio, o que altere la redistribución de energía dentro de la atmósfera y entre atmósfera, tierra y océano, puede afectar el clima. Un cambio en la energía radiativa neta disponible para el sistema mundial Tierra-atmósfera se denomina **forzamiento radiativo**. Los forzamientos radiativos **positivos** tienden a calentar la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior. Los forzamientos radiativos **negativos** tienden a enfriarlas (Figura 1).

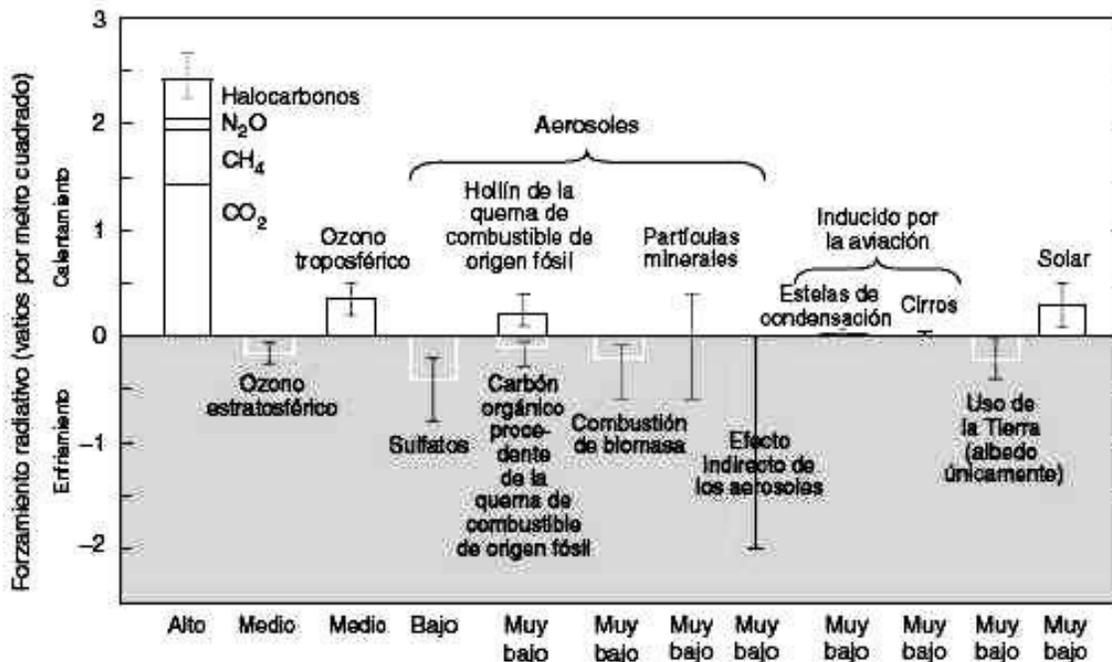


Figura 19.1: Gases y procesos radiativos, que producen enfriamiento y calentamiento del sistema tierra-atmósfera y peso que tiene en dicho sistema (Alto a muy bajo).

Los aumentos en las concentraciones de **gases de efecto invernadero** (GEI) reducirán la eficiencia con la cual la superficie de la Tierra irradia energía al espacio. La atmósfera absorbe más radiación terrestre que se desprende de la superficie y vuelve a emitirla en altitudes superiores y temperaturas más bajas. Así se produce un forzamiento radiativo positivo que tiende a calentar la atmósfera inferior y la superficie. Como se desprende menos calor hacia el espacio, se refuerza el **efecto invernadero** (Figura 2), es decir que se intensifica un efecto que ha ocurrido en la atmósfera de la Tierra durante miles de millones de años, debido a la presencia de GEI que se producen naturalmente: vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, metano y óxido nítrico. La cantidad de forzamiento radiativo depende de la magnitud del aumento en la concentración de cada GEI, de las propiedades radiativas de los gases en cuestión y de las concentraciones de otros GEI ya

presentes en la atmósfera. Además, muchos GEI permanecen en la atmósfera durante siglos después de haber sido emitidos, introduciendo así un compromiso a largo plazo de forzamiento radiativo positivo.

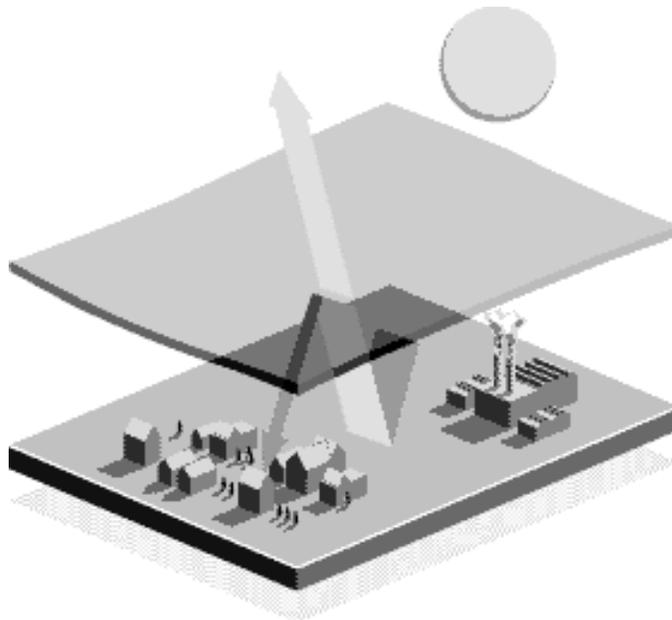


Figura 19.2: Esquema del “efecto invernadero”.

Los aerosoles (partículas o gotitas microscópicas en el aire) antropógenos en la troposfera, como los que se derivan de los combustibles de origen fósil y de la combustión de biomasa, pueden reflejar la radiación solar, lo cual provoca una tendencia al enfriamiento en el sistema climático. Así como puede absorber la radiación solar, los aerosoles de hollín tienden a calentar el sistema climático. Además, los cambios en las concentraciones de aerosoles pueden alterar la nubosidad y la reflectividad de las nubes, por su efecto sobre las propiedades y duración de las nubes. En la mayoría de los casos, los aerosoles troposféricos tienden a producir un forzamiento radiativo negativo y a enfriar el clima. Tienen una duración mucho más breve (de días a semanas) que la mayor parte de los GEI (de decenios a siglos) y, como resultado, sus concentraciones responden mucho más rápidamente a los cambios en las emisiones.

La actividad volcánica puede inyectar en la estratosfera grandes cantidades de gases azufrosos (sobre todo, anhídrido sulfuroso), que se transforman en aerosoles de sulfatos. Las erupciones individuales pueden producir un gran forzamiento radiativo negativo, aunque transitorio, tendiente a enfriar la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior por períodos de unos pocos años.

La generación de energía del Sol varía en pequeñas cantidades (0,1%) en un ciclo de actividad de once años y además pueden producirse **variaciones** por períodos más prolongados. En escalas temporales de decenas a miles de años, las lentas variaciones en la órbita de la Tierra, que se conocen bien, han ocasionado cambios en la distribución estacional y latitudinal de la radiación solar. Esos cambios han desempeñado un importante papel al controlar las **variaciones** del clima en el pasado remoto, como en los ciclos glaciales e interglaciales.

Cuando cambian los forzamientos radiativos, el sistema climático responde en diversas escalas temporales. Las más prolongadas se deben a la gran capacidad de almacenamiento de calor de las profundidades de los océanos y al ajuste dinámico de los mantos de hielo. Esto significa que la respuesta transitoria a un cambio (positivo o negativo) puede durar miles de años. Todo cambio en el equilibrio radiativo de la Tierra, incluso los debidos a un incremento en los GEI o en los aerosoles, alterará el ciclo hidrológico mundial y la circulación atmosférica y oceánica, afectando por lo tanto las temperaturas y precipitaciones regionales.

Todo cambio en el clima inducido por los seres humanos se añadirá a las **variaciones climáticas** naturales que se producen en toda una gama de escalas temporales y espaciales. La variabilidad climática puede generarse como resultado de cambios naturales en el forzamiento del sistema climático, por ejemplo variaciones de intensidad de la radiación solar entrante y cambios en las concentraciones de aerosoles producidos por erupciones volcánicas.

También pueden producirse variaciones climáticas naturales sin que exista un cambio en el forzamiento externo, como resultado de complejas interacciones entre los componentes del sistema climático, como en el acoplamiento entre la atmósfera y los océanos. El fenómeno El Niño-Oscilación Austral (ENOA) es un ejemplo de esa variabilidad natural “interna” en escalas temporales interanuales. Para distinguir los cambios climáticos antropógenos de las variaciones naturales, es necesario identificar la “señal” antropógena distinta del “ruido” de fondo de la variabilidad climática natural.

## 19.1 ¿A que se denomina Cambio y Variabilidad Climáticas?

**19.1.1 Variabilidad Climática:** Se denomina como tal a las perturbaciones que oscilan alrededor de un valor medio, de manera que el promedio de las mismas es aproximadamente nulo. Estas perturbaciones deben ser aleatorias, o en caso de ser periódicas o cuasi periódicas, el período de las mismas debe ser menor del orden de los 10 años. Cuando este valor se excede ya puede hablarse de cambio climático porque la perturbación dura lo suficiente como para que se requiera un ajuste tecnológico del sistema productivo.

**19.1.2 Cambio Climático:** Son perturbaciones que se mantienen en el tiempo, de manera que lleva a un ajuste tecnológico. Puede ser parte de un ciclo periódico de larga duración cuya persistencia requiere ajustes tecnológicos de un sentido u otro para ajustarse a una situación que persiste.

La **Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC)** de las Naciones Unidas, en su Artículo 1, define el “cambio climático” como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.” Sin embargo en su informe técnico dice que es: una “variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un período prolongado (generalmente durante decenios o por más tiempo)”(Figura 3).

El cambio del clima puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo, o a cambios antropógenos duraderos en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra.

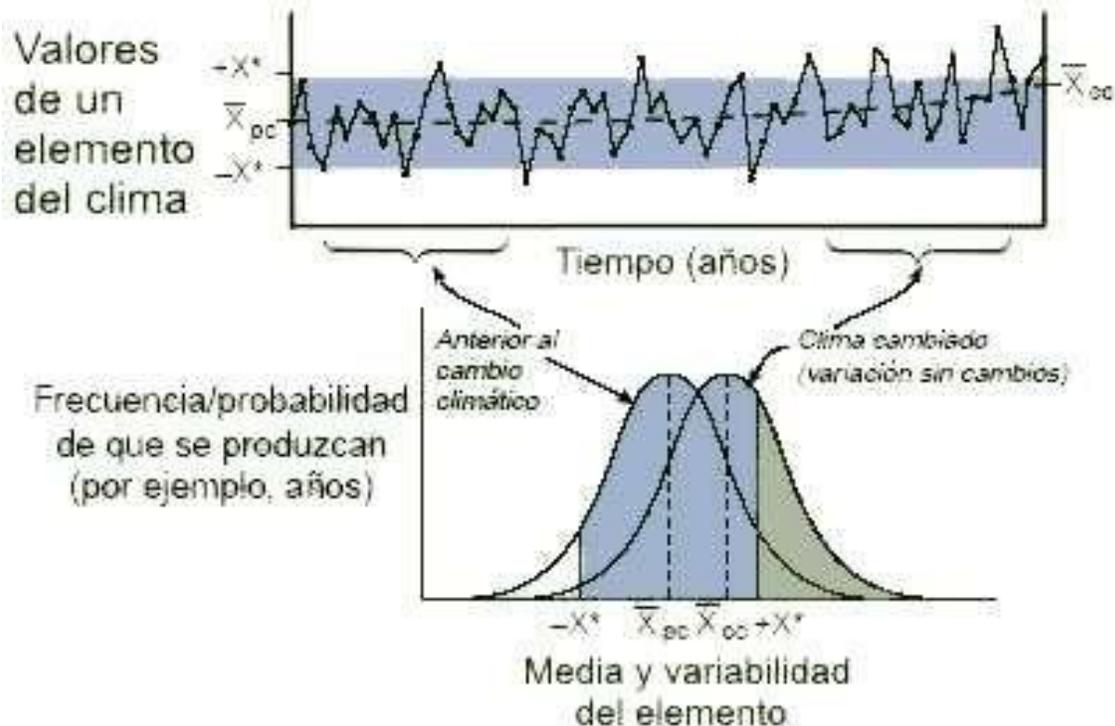


Figura 19.3: Esquema estadístico de cambio climático.

Donde:

$\bar{X}_{pc}$ : Valor de la media de la variable al principio del proceso

$\bar{X}_{cc}$ : Valor de la media de la variable al final del cambio climático

$+X^*$  y  $-X^*$ : Desviación típica del valor de la media al principio del cambio

#### 19.1.2.1 Algunas consideraciones acerca de las concentraciones de gases atmosféricos de efecto invernadero.

De acuerdo al informe de la IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático):

- La concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ha aumentado en un 31 % desde 1750. La concentración actual de CO<sub>2</sub> no se había superado en los últimos 420.000 años y es probable que tampoco en los últimos 20 millones de años. El ritmo actual de crecimiento no tiene precedentes, al menos en los últimos 20.000 años.
- Unas tres cuartas partes de las emisiones antropógenas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante los últimos 20 años se deben a la quema de combustibles de origen fósil. El resto se debe principalmente a cambios en el uso de la tierra, especialmente la deforestación.
- Los océanos y la tierra actualmente captan juntos la mitad de las emisiones antropógenas de CO<sub>2</sub>. En la tierra, la absorción de CO<sub>2</sub> antropógeno muy

probablemente superó las emisiones de CO<sub>2</sub> a causa de la deforestación en los años noventa.

- El ritmo de aumento de la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico fue de 1,5 ppm (0,4 %) por año en los dos últimos decenios. En los años noventa, el aumento anual varió de 0,9 ppm (0,2 %) a 2,8 ppm (0,8 %).
- La concentración del metano (CH<sub>4</sub>) en la atmósfera ha aumentado en 1.060 ppmm (151 %) desde 1750 y sigue aumentando. La concentración de CH<sub>4</sub> no se había superado en los últimos 420.000 años. El crecimiento anual de la concentración de CH<sub>4</sub> fue más lento y se hizo más variable en los años noventa en comparación con los ochenta. Un poco más de la mitad de las emisiones de CH<sub>4</sub> actuales son antropógenas (por ejemplo, utilización de combustibles de origen fósil, ganadería, cultivo del arroz y vertederos).
- La concentración de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en la atmósfera ha aumentado en 46 ppmm (17 %) desde 1750 y sigue aumentando. La concentración actual de N<sub>2</sub>O no se ha superado al menos durante los últimos mil años.
- Desde 1995 las concentraciones atmosféricas de muchos de los gases de halocarbonos que agotan la capa de ozono y tienen un efecto invernadero (por ejemplo, CFCl<sub>3</sub> y CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) están aumentando más lentamente o disminuyendo, en ambos casos como consecuencia de la reducción de las emisiones con motivo de la reglamentación del Protocolo de Montreal y de sus Enmiendas. Sus componentes substitutivos (por ejemplo, CHF<sub>2</sub>Cl y CF<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>F) y otros componentes sintéticos (por ejemplo, los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)) son también gases de efecto invernadero y sus concentraciones están aumentando actualmente (Figura 4).

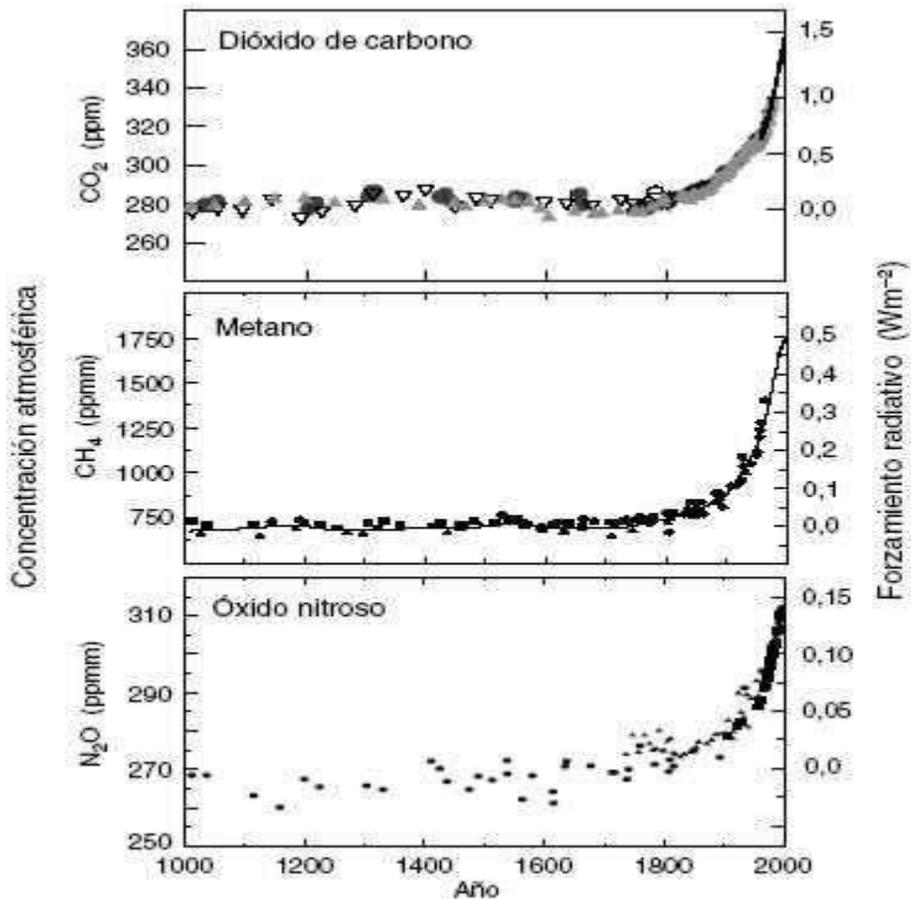


Figura 19.4: Cambios en la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en los últimos 1000 años. Los datos corresponden a muestras de hielo y de nevadas en diversos sitios de la Antártida y de Groenlandia suplementados con datos de muestras atmosféricas directas de los últimos decenios.

#### 19.1.2.2 Algunas consecuencias del cambio climático.

- La temperatura media mundial de la superficie (es decir, el promedio de la temperatura del aire cerca de la superficie de la tierra y de la temperatura de la superficie del mar) ha subido desde 1861. Durante el siglo XX, el aumento ha sido de  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  (Figura 5). El registro muestra una gran variabilidad. Por ejemplo, la mayor parte del calentamiento que se produjo en el siglo XX tuvo lugar en dos períodos: de 1910 a 1945 y de 1976 a 2000.
- Mundialmente, es muy probable que los años noventa hayan sido el decenio más cálido y 1998 el año más cálido en el registro instrumental desde 1861.
- Los nuevos análisis de datos indirectos del hemisferio norte indican que el aumento de la temperatura en el siglo XX probablemente haya sido el mayor de todos los siglos en los últimos mil años. También es probable que, en el hemisferio norte, los años noventa hayan sido el decenio más cálido y 1998 el año más cálido. Al disponer de menos datos, también sabemos menos acerca de las

medias anuales anteriores a los últimos mil años, así como de las condiciones reinantes en la mayoría del hemisferio sur antes de 1861.

- Entre 1950 y 1993, las temperaturas diarias mínimas del aire por la noche sobre el suelo aumentaron un promedio de  $0,2^{\circ}\text{C}$  por decenio, lo cual equivale al doble del ritmo de aumento de las temperaturas diarias máximas del aire durante el día ( $0,1^{\circ}\text{C}$  por decenio). Esto ha alargado la estación sin heladas en muchas regiones de latitudes medias y altas.

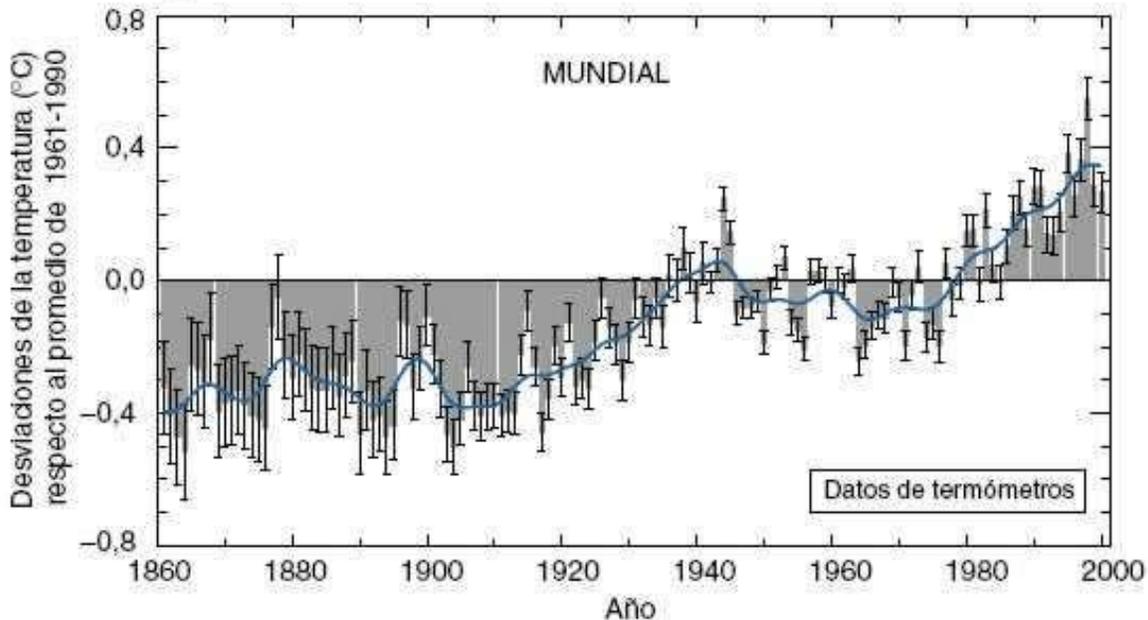


Figura 19.5: Variaciones de la temperatura de la superficie de la Tierra en los últimos 140 años y en el último milenio.

- Es muy probable que las precipitaciones hayan aumentado de 0,5 a 1 % por decenio en el siglo XX en la mayoría de las latitudes medias y altas de los continentes del hemisferio norte y es probable que la cantidad de lluvia haya aumentado de 0,2 a 0,3 % por decenio en las regiones tropicales (de  $10^{\circ}\text{N}$  a  $10^{\circ}\text{S}$ ). Los aumentos en los trópicos no son obvios en los últimos decenios.
- También que la cantidad de lluvia haya disminuido en un 0,3% por decenio en gran parte de las zonas subtropicales (de  $10^{\circ}\text{N}$  a  $30^{\circ}\text{N}$ ) del hemisferio nortedurante el siglo XX.
- Contrariamente al hemisferio norte, no se han detectado cambios sistemáticos comparables en los promedios latitudinales amplios del hemisferio sur. No hay datos suficientes para establecer las tendencias de las precipitaciones en los océanos.
- En las latitudes medias y altas del hemisferio norte es probable que en la segunda mitad del siglo XX haya habido un aumento del 2 al 4 % en la frecuencia de las precipitaciones fuertes.
- Es probable que haya habido un aumento de la nubosidad del 2 % en las zonas de latitud media y alta durante el siglo XX. En la mayoría de las zonas las tendencias

corresponden bien a la disminución observada de la amplitud de la variación de las temperaturas diarias.

- Desde 1950 es muy probable que haya habido una reducción de la frecuencia de las temperaturas muy bajas y un menor aumento de la frecuencia de las temperaturas muy altas.
- Los episodios de calor del fenómeno El Niño-Oscilación del sur (ENSO) (que frecuentemente influye en las variaciones regionales de precipitaciones y temperaturas en muchas zonas de los trópicos, de los subtropicos y en algunas zonas de latitud media) han sido más frecuentes, persistentes e intensos desde mediados de los años 70 en comparación con los cien años anteriores.
- En el siglo XX (de 1900 a 1995) ha habido aumentos relativamente pequeños en las zonas terrestres con fuertes sequías o fuerte humedad. En muchas regiones, estos cambios están dominados por una variabilidad climática interdecenal y multidecenal.
- En algunas regiones, como en zonas de Asia y África, se ha observado un aumento de la frecuencia y de la intensidad de las sequías en los últimos decenios.
- La disminución casi mundial en la extensión de los glaciares de montaña y de la masa de hielo coincide con los aumentos de la temperatura en la superficie, en el mundo entero. Unas pocas excepciones recientes en las regiones costeras son coherentes con las variaciones en la circulación atmosférica y los correspondientes aumentos en las precipitaciones.
- Las reducciones en la capa de nieve y el acortamiento de las temporadas de congelación en lagos y ríos se relacionan bien con los aumentos de temperatura en la superficie terrestre, en el hemisferio norte.
- La reducción sistemática de la extensión del hielo marino en primavera y verano y de su espesor en el Ártico es coherente con los aumentos de temperatura en la mayoría de las tierras y océanos adyacentes.
- El contenido de calor de los océanos se ha incrementado y ha subido el nivel medio del mar en todo el mundo.
- Los aumentos en el vapor de agua total en la troposfera en los últimos 25 años son cualitativamente coherentes con los aumentos de las temperaturas en la troposfera y con un ciclo hidrológico aumentado, que provoca precipitaciones más extremas y más intensas en muchas áreas donde cada vez son mayores las precipitaciones, p.ej., en las latitudes medias y altas del hemisferio norte.

## 19.2 Escenarios de Cambio Climático en la Argentina

El siguiente informe se basa en escenarios creados en base a información climática preparada por la Unidad de Investigación Climática, del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change o IPCC), que utilizan siete modelos climáticos globales.

Con respecto a la temperatura, utilizan un solo índice, que es la temperatura anual media en Argentina la cual infieren ha aumentado en cerca de 1°C en el último siglo. La década de los 1990 ha sido la más calurosa en este siglo (Figura 6) con el año 1995 como el más calido registrado en el siglo. Este calentamiento ha ocurrido en todas las estaciones del año, casi igualmente, siendo un poco mayor en los meses de Junio a Agosto. Paralelamente con el calentamiento del clima, la frecuencia de heladas ha ido

disminuyendo. Aunque parte del noreste de Argentina es virtualmente libre de heladas, la cordillera Andina y las planicies y penínsulas del sureste experimentan mas heladas cada año. Sin embargo cuando se hacen promedios a lo largo del país, se observa una disminución en el número de días de heladas por año en cerca del 10 por ciento durante este siglo (Figura 6).

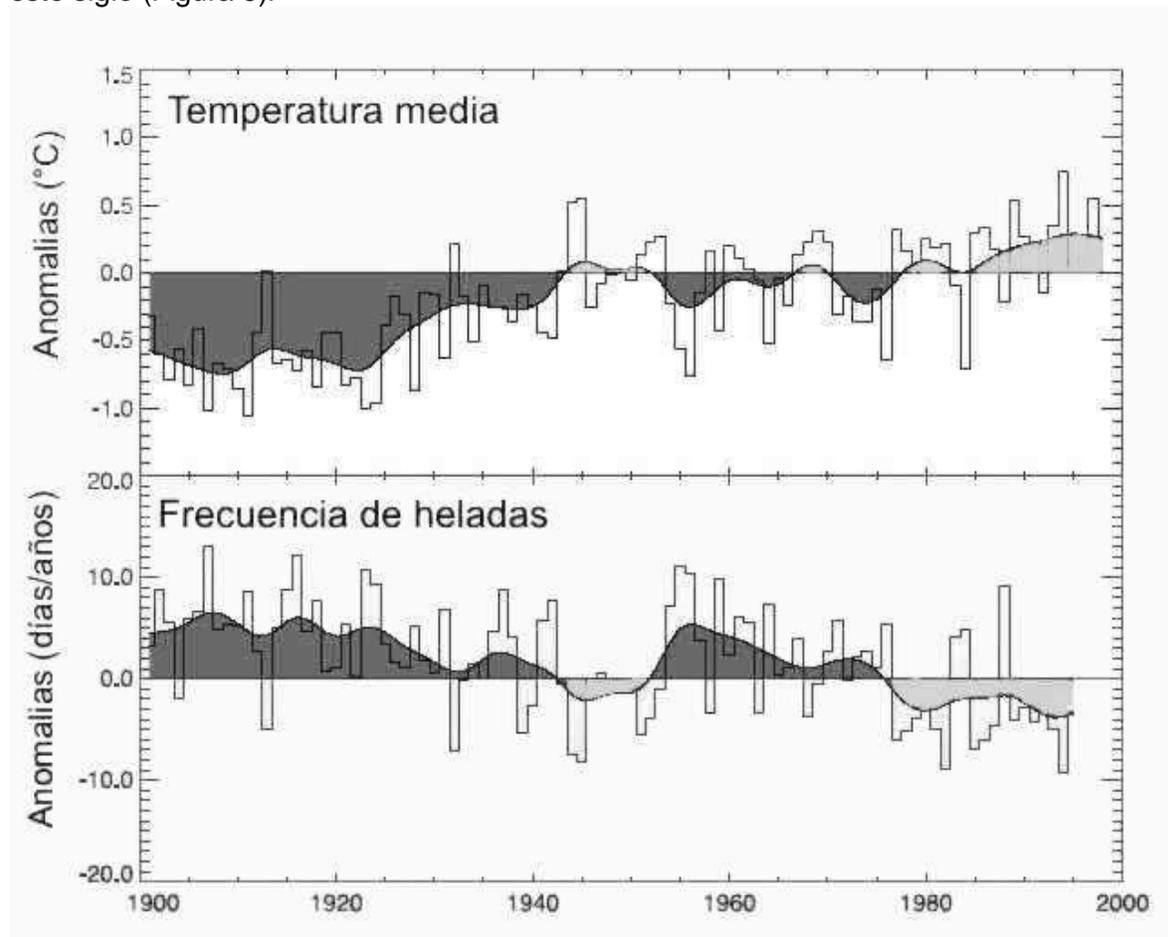


Figura 19.6: Cambios en la temperatura anual media, 1901-1998 (arriba) y frecuencia anual de heladas 1901-1998 (abajo), sobre Argentina. Los cambios son con respecto al promedio 1961-90 de valores climáticos de 14.5°C y 69 días respectivamente.

En cuanto a los escenarios futuros respecto a la temperatura, se utilizaron modelos que proyectan el aumento de la temperatura del aire, de acuerdo a cantidades crecientes de gases de efecto invernadero sin que exista ninguna política de mitigación (Figura7).

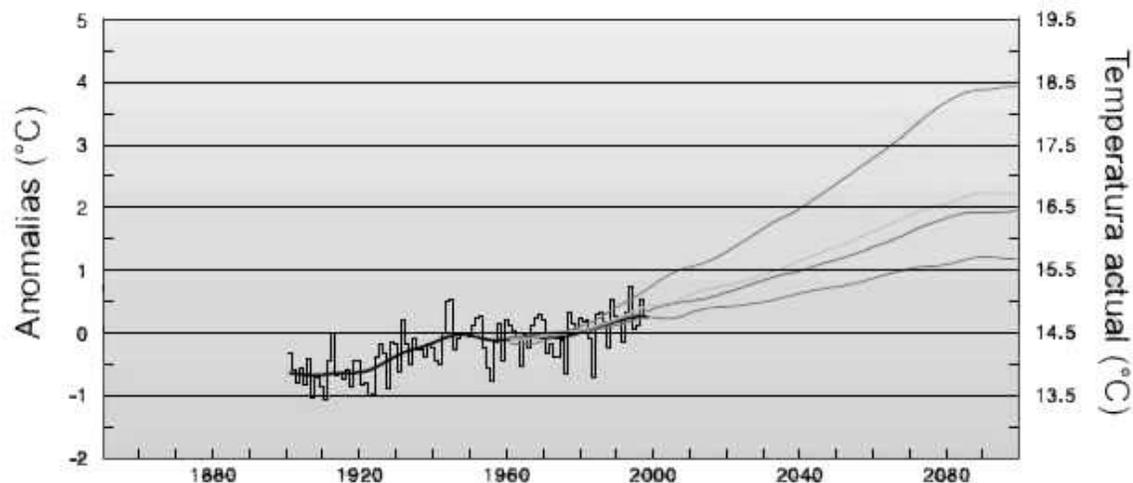


Figura 19.7: Temperatura anual del aire en cuatro escenarios climáticos, utilizando concentraciones de CO<sub>2</sub>, desde 320 a 830 ppm, hasta el año 2100.

Los cambios estimados en las precipitaciones difieren entre las regiones del este y del oeste de Argentina. La precipitación anual declina hacia el Oeste del país, disminuyendo en algunos lugares alrededor de un 15 por ciento para la década 2080. El oriente del país experimentaría un incremento en la precipitación anual en menos del 5 por ciento. Este contraste entre un occidente seco y un oriente húmedo, es más consistente entre las estaciones.

### 19.3 FUENTES DE VARIABILIDAD CLIMATICA: “EI NIÑO OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO)”

El Fenómeno “El Niño Oscilación Del Sur (Enso) es la consecuencia de un ciclo alternativo de calentamiento y enfriamiento que tiene lugar en el Océano Pacífico Ecuatorial.

Las corrientes marinas frías de California y de Humboldt convergen sobre las costas de Perú y Ecuador, y ascienden levantando sedimentos del fondo oceánico que fertilizan las aguas, generando una de las áreas pesqueras más productivas del mundo, mientras que sobre el continente se generan climas costeros secos y relativamente fríos.

Las aguas superficiales cálidas son impulsadas por los Vientos Alisios en dirección al Asia, creando una fuerte diferencia de temperatura. Darwin, en el norte de Australia, tiene una temperatura media de 27,5 °C, muy superior a la de Lima, que se encuentra a la misma latitud (12° Sur) y registra un promedio de sólo 18,4 °C. Cabe consignar que la temperatura media anual de la ciudad Buenos Aires, situada 2500 Km más al sur (35° Sur), es de 17,0 °C, lo cual da una clara idea de lo frío que es el clima costero del Perú con relación a su ubicación geográfica.

Cuando ambas corrientes frías disminuyen su intensidad, la temperatura del lado americano del océano aumenta rápidamente y comienza “El Niño”, nombre debido a que suele alcanzar su máxima intensidad coincidentemente con la festividad de la navidad cristiana, produciendo fuertes trastornos climáticos globales, que incluyen fuertes lluvias sobre Perú y Ecuador y sequías en Australia, India, Malasia e Indochina. En Argentina,

sus efectos se traducen en sequía y calor en el Noroeste, y lluvias por encima de lo normal, alta nubosidad y temperaturas por debajo de la media en la Región Pampeana y Noreste. Contrariamente, cuando las corrientes marinas frías se intensifican, la diferencia de temperatura entre ambos márgenes del océano se incrementa aún más, iniciándose “La Niña”, que causa sequías en Sudamérica, fuertes lluvias en Australia oriental, etc. En Argentina, el patrón de anomalías se invierte, el Noroeste observa lluvias por encima de lo normal, alta nubosidad y temperaturas por debajo de la media, mientras que en la Región Pampeana y Noreste sus efectos son sequía primaveral y prolongadas olas de calor.

El Niño no tiene una periodicidad conocida, aunque término medio se produce a intervalos de entre tres a ocho años, pudiendo prolongarse hasta tres años consecutivos y varían de acuerdo a la época del año en la que suceden (Figuras 8 y 9). Su notable característica de poder detectarse con varios meses de anticipación ha dado impulso al desarrollo de métodos de pronóstico climático a mediano y largo plazo, produciendo un gran interés por parte de la comunidad científica internacional, lo cual ha contribuido sin duda a la enorme repercusión que recientemente ha alcanzado en los medios de comunicación.

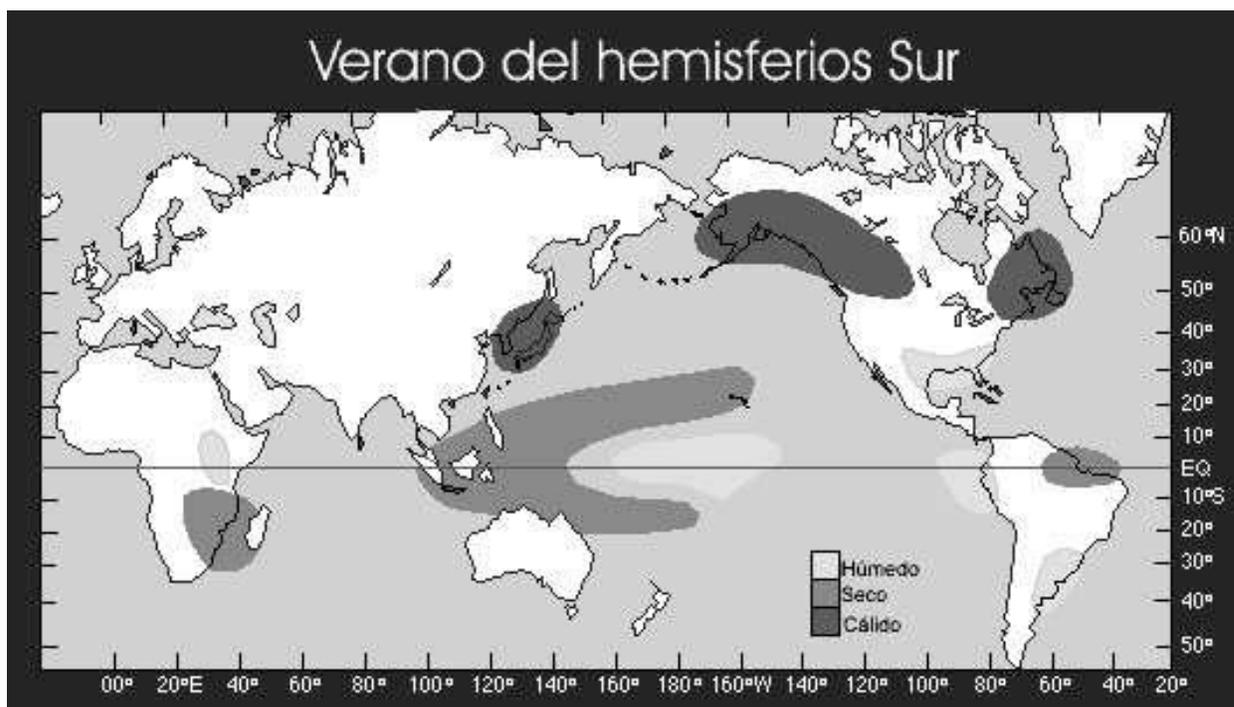


Figura 18.8: Regiones de impacto del fenómeno de El Niño, en verano del hemisferio sur.

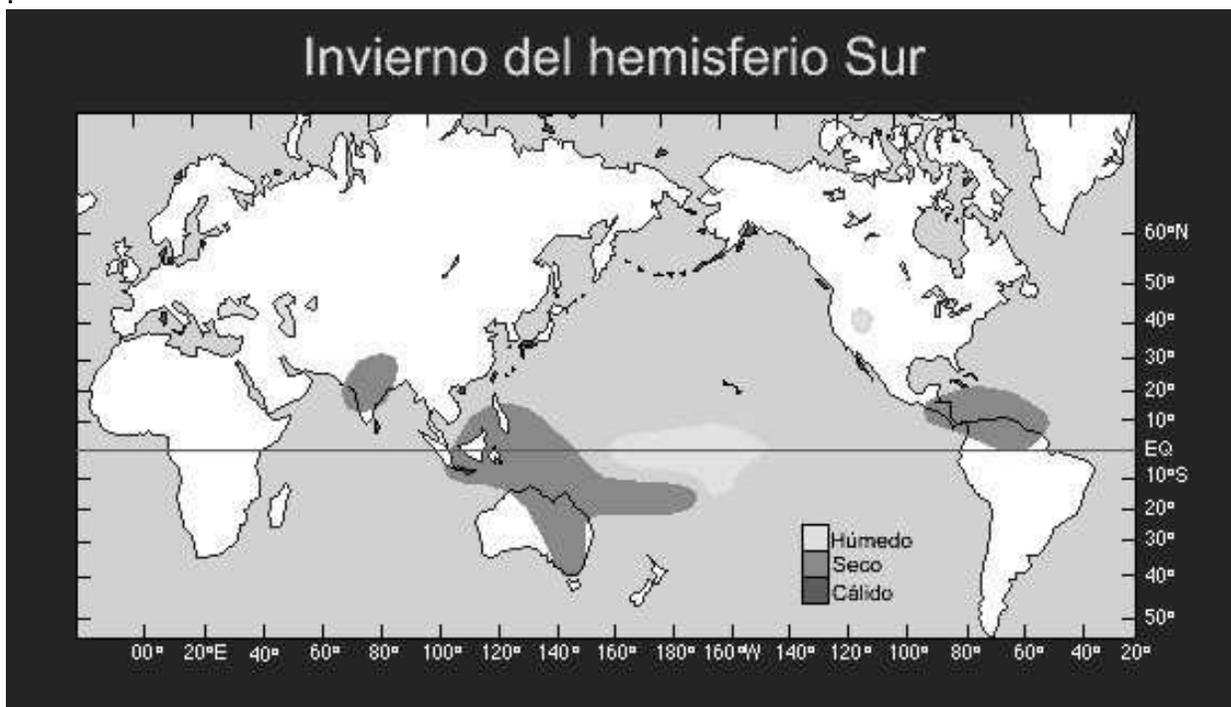


Figura 19.9: Regiones de impacto del fenómeno de El Niño, en invierno del hemisferio sur.

#### 19.4 CAMBIO EN EL MICROCLIMA URBANO

De todos los fenómenos de cambio climático éste es el más incontestablemente comprobado. Derivada del aumento urbano de consumo de energía y de la transformación de la superficie dentro de las ciudades. Esto determina un incremento del régimen térmico dentro de las “islas de calor” urbanas que se está haciendo sentir en todo el mundo. Socialmente está causando el éxodo de la población de mayores recursos que deja las ciudades y se traslada a las áreas de clubes de campo y barrios privados de los alrededores. Dado que la mayor parte de las series de temperatura utilizadas en los estudios de Calentamiento Global provienen de ciudades, los detractores de esa teoría argumentan que lo que está aumentando no es la temperatura global del planeta sino el régimen térmico del microclima urbano. Esto es tema de discusión, pero no cabe duda que el régimen térmico urbano se ha modificado mucho más que el de las áreas rurales. En cualquier caso, es fácil advertir que el cambio en el microclima urbano no tiene un efecto significativo sobre los cambios en el esquema productivo de la Región Pampeana.

#### 19.5 AGUJERO DE OZONO

Este fenómeno consiste en la posible disminución de la capa de ozono ( $O_3$ ) que se encuentra en la Estratosfera, a unos 35 Km de altura, y protege a la biosfera de la llegada de un exceso de radiación ultravioleta. Este fenómeno, descubierto hace unos 20 años tiene una gran importancia biológica ya que los rayos ultravioletas pueden causar daños en la piel y la vista de los seres humanos, y son capaces de producir efectos ecológicos importantes. No obstante, la radiación ultravioleta es sólo un 2 % del total del espectro solar por lo que

sus efectos energéticos son poco importantes. Por eso no debe confundírsele con el Calentamiento Global que implica cambios en el balance energético mucho mayores.

#### **19. 4 CAMBIO Y VARIABILIDAD CLIMATICOS EN LA REGION ARGENTINA DE CULTIVO DE GRANOS EN SECANO**

La Región Argentina de clima Templado Húmedo (C) según la Clasificación de Koeppen/Trewartha, presenta una alta variabilidad climática, que durante las últimas años ha venido causando problemas de distinto signo, en la producción de cultivos sin riego, alternándose sequías con inundaciones, con un ciclo cuasi periódico, de unos 100 años de duración, durante el cual se atraviesan cuatro fases o etapas de unos 25 años cada una: Fase Seca; Transición Seca/Húmeda; Fase Húmeda; y Transición Húmeda/Seca.

La Fase Seca se inició en 1927 y duró hasta 1929 que, aunque no tuvieron una excesiva intensidad, produjeron un efecto acumulativo importante, y tomaron al suelo en su momento de mayor vulnerabilidad. Esto dio origen a un período de voladuras que duró mucho tiempo, porque una vez deteriorada la capa superficial del suelo y con el manejo de alto impacto propio de la tecnología de la época el proceso siguió y se extendió hasta bien entrados los sesenta.

La disminución de las lluvias y la escasa capacidad de retención de agua de los suelos deteriorados dieron lugar a una intensificación del régimen térmico. Durante los años cuarenta y comienzos de los cincuenta ocurrieron los veranos más calurosos y los inviernos más fríos. Además aumentó la variabilidad, y se registraron heladas estivales el 18 de enero de 1938 y el 17 de diciembre de 1954.

A comienzos de los sesenta se entró en una Transición Seca/Húmeda, pero recién cuando se empezaron a emplear técnicas de recuperación de suelos, se pudo aprovecharla mejora climática. Este proceso de mejora de las lluvias continuó en aumento y a mediados de los setenta se entró en una Fase Húmeda que se extendió hasta mediados de los 90. El aumento de las lluvias fue acompañado por una moderación del régimen térmico. Los veranos se hicieron menos rigurosos, los inviernos más templados y el régimen de heladas mejoró considerablemente. Dentro de este lapso se produjeron gran parte de los cambios productivos en la Región Pampeana, de manera que puede decirse que los mismos fueron acompañados por una evolución favorable del clima.

Esta Fase Húmeda determinó un avance hacia el Oeste del límite entre el Clima C (Clima templado lluvioso) y el BS (clima de estepa), haciendo que el Este de San Luis y La Pampa, y Oeste de Córdoba y Buenos Aires, pasaran de un clima semiárido a otro subhúmedo. De esta manera el clima se unió al avance tecnológico favoreciendo el corrimiento hacia el oeste de la frontera de la agricultura. Este proceso tuvo su reverso en el margen oriental de la región, cuyo régimen de lluvias se incrementó hasta valores que, en Entre Ríos determinaron una disminución de la superficie cultivada. En los últimos años esto comenzó a ser subsanada mediante la introducción de cultivos tolerantes a los excesos hídricos, como la soja y el arroz, pero el impacto inicial fue alto.

Es difícil determinar la duración temporal de este ciclo húmedo, debido a que, si bien se presentan años más secos esto forma parte de la variabilidad natural del clima.

## BIBLIOGRAFÍA

- IPCC 1990: "Climate Change". The IPCC Scientific Assessment. WMO/UNEP. Edited by J.T. Houghton, G.J.Jenkins and J.J. Ephraums. Cambridge University Press, 365 pp.
- Mike Hulme y Nicola Sheard. 2001. Escenarios de Cambio Climático para Argentina. Unidad de Investigación Climática, Universidad de East Anglia, Norwich, Reino Unido. 6 pp.
- IPCC 2001. Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático 2001. La base científica. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 94 pp.
- Sierra E. 2000. Apuntes de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Ayuda Didáctica. 2000. Capítulo 2. CEABA.
- Nuñez, M. y Ciappesoni, H.. 1984. Base física del clima 2. Variabilidad climática y modelos climáticos. Curso Internacional de Postgrado en Climatología. Pág.1-6.

## 20.1 HELADA

### 20.1.1 La helada como fenómeno agroclimático

#### 20.1.1.1 Concepto agroclimático de helada

El fenómeno de helada como contingencia agrícola ocurre cuando la temperatura del aire desciende a temperaturas tan bajas que producen la muerte de las plantas; es decir cuando se produce la muerte de los tejidos vegetales por efecto del frío. Esta definición, tan satisfactoria desde un punto de vista agrícola, resulta muy compleja cuando se considera el fenómeno como forma climática, meteorológica o simplemente geográfica.

En la gran mayoría de los estudios agroclimáticos realizados sobre heladas, se considera como helada la ocurrencia de temperaturas iguales o inferiores a 0°C, en el abrigo meteorológico a 1,50 metros de altura sobre el suelo, independientemente de su duración e intensidad.

#### 20.1.1.2 Caracterización agroclimática de las heladas

El régimen de heladas se determina en función de:

1. época de ocurrencia
2. intensidad
3. duración
4. tipo genético
5. distintas modalidades de frecuencia de las características mencionadas en 1.,2.,3.,4.

Esta información no se obtiene de las estaciones meteorológicas sinópticas o climáticas. Estas sólo informan sobre la época de ocurrencia e intensidad.

Según la época de ocurrencia pueden ser: **primaverales**, **otoñales**, **estivales** e **invernales**. Las heladas primaverales (o heladas tardías) y otoñales (heladas tempranas) se caracterizan más por la época de ocurrencia que por su intensidad. Esto se debe a que pequeñas diferencias de la época de ocurrencia de una misma temperatura bajo 0°C puede sorprender a las plantas en sus momentos de mayor o menor sensibilidad y por lo tanto ocasionar o no perjuicios.

En el régimen de heladas invernales, por el contrario interesa más la intensidad que el detalle de la fecha del fenómeno, ya que la resistencia a los fríos durante la estación es muy estable en cada especie vegetal.

#### 20.1.1.3 Fechas medias de primeras y últimas heladas

Para estudiar las épocas de las heladas debemos establecer cuales son las **fechas medias de primeras y últimas heladas**. Para su determinación, es necesario disponer de un registro meteorológico de muchos años. De cada año del registro se sacan las fechas de primeras y últimas temperaturas mínimas iguales o inferiores a 0°C. Promediando por separado estas fechas se obtienen los valores buscados. El período de tiempo en días que va desde la fecha media de primera helada a la fecha media de última helada se conoce con el nombre de **período medio con heladas**. De lo contrario, el lapso que va desde la fecha media de última a la fecha media de primera, recibe el nombre de período medio sin heladas. Además de las fechas medias, es necesario, dar algún índice de variabilidad estadística; por ejemplo la desviación estándar.

**1) Cálculo de fecha media de primera helada o de última helada.** Para cada año del record, se anota la fecha en que se produjo la primera temperatura mínima de 0°C o inferior. El promedio de esas fechas será la fecha media de primera helada para una determinada localidad. Para promediar fechas resulta conveniente transformarlas en el número de día correlativo que le corresponde en el año, así el día 1 es el 1° de enero y el 365 el 31 de Diciembre. Para el cálculo de la fecha media de última helada se procede de igual forma solo que se consideran la última fecha en las que la temperatura mínima es 0°C o inferior.

**2) Cálculo de la fecha extrema de primera helada o de última helada.** Corresponde a las fechas en las que se produjo la primera y la última helada del año. Para aquellas localidades que en algunos años no registre heladas, el cómputo de fecha media de primera y última helada como así sus correspondientes fechas extremas, se hará sobre la base de los datos de años con helada, siendo necesario en tales casos acompañar el dato de porcentaje años con heladas.

### 20.1.2 La helada como fenómeno meteorológico

#### 20.1.2.1 Factores físicos en la ocurrencia de heladas:

La ocurrencia de las heladas responde a la acción de distintos factores del medio físico, uno de ellos macrometeorológicos y el otro micrometeorológicos.

Los factores macrometeorológicos determinan el proceso del tiempo que generan las heladas y contribuyen a definir la época de ocurrencia, la extensión del fenómeno y sus tipos genéticos. Los factores micrometeorológicos, en cambio, son los elementos físicos locales que influyen en gran parte en la intensidad, duración, y magnitud de los daños por helada.

El conocimiento de ambos aspectos es de mayor importancia agroclimática. El primero de ellos ayuda a interpretar el régimen agroclimático; el segundo, que puede servir para el ajuste práctico y de los pronósticos, resulta indispensable en lo más importante que tiene este problema que es la aplicación de los métodos de prevención y lucha de esta adversidad de la agricultura.

#### 20.1.2.2 Factores macrometeorológicos:

Se destacan dos, en una acción combinada: el balance calórico regional de la radiación, y la circulación general de la atmósfera. En muchos aspectos definen el tipo de heladas según su génesis. De esta manera se pueden clasificar en **heladas de advección, de radiación y mixtas**. Según su aspecto visual se clasifican en **blancas y negras**.

Las **HELADAS DE ADVECCION** son provocadas por una invasión de aire con temperaturas muy frías, provenientes de las regiones polares o subsolares. Este fenómeno es mas frecuente en las regiones continentales o en algunas zonas marítimas del hemisferio norte. Allí las regiones árticas o subárticas originan masas de aire muy frío, que incursionan regiones de mas bajas latitudes, ocasionando este tipo de heladas en los territorios que alcanza. Por tal condición gran parte de la superficie del suelo quedan con temperaturas congelantes por uno o varios días consecutivos, provocando serios daños a la agricultura. Estas heladas advectivas no presentan inversión de temperatura. La temperatura del suelo es superior al de niveles superiores en el aire y por lo tanto no puede haber inversión (Figura 8.1)

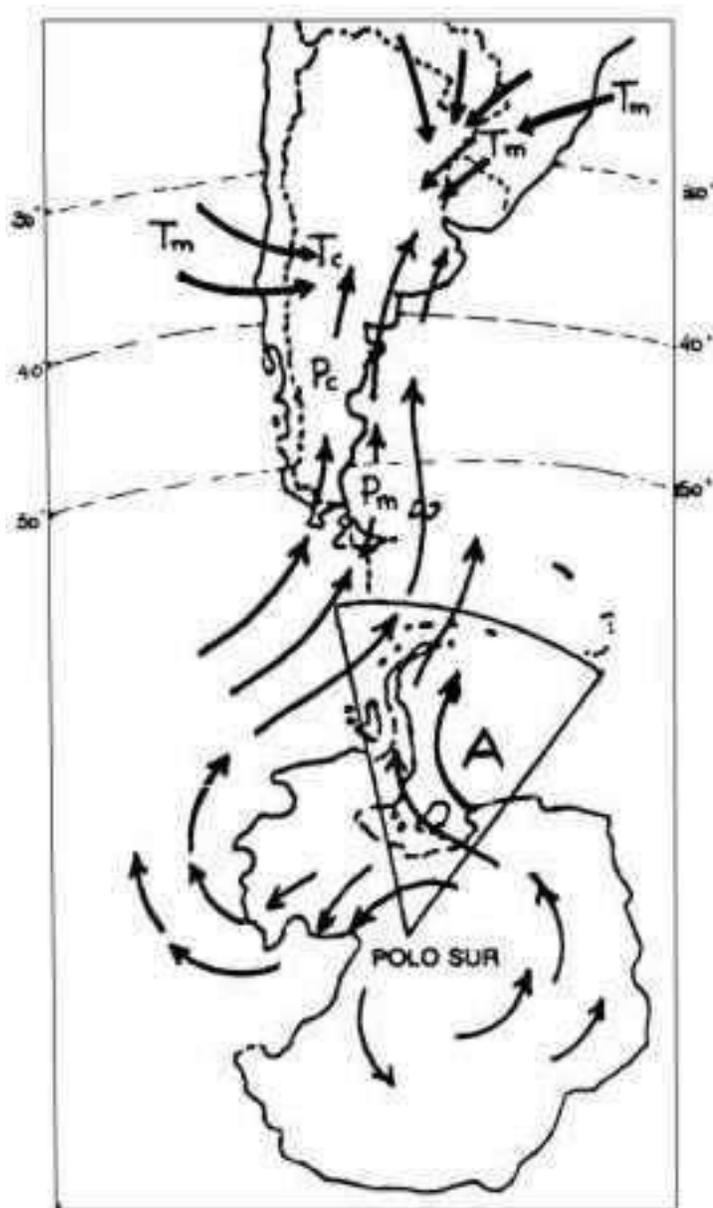


Figura 20.1: Masas de aire provenientes de las regiones polares y subsolares.

Las **HELADAS DE RADIACION** son aquellas que ocurren como consecuencia del balance de radiación negativo. La inversión de la temperatura en el aire cercano al suelo, es otra característica esencial de éstas heladas. Por encima de la capa de inversión la temperatura su gradiente normal recupera, o sea disminuye con la altura (Figura 8.2)

Las **HELADAS MIXTAS** pueden ocurrir por una combinación de las heladas por advección y por radiación. Es decir que primero una masa de aire frío lleve las condiciones atmosféricas a niveles tales del balance de radiación que produzcan temperaturas en límites críticos perjudiciales para la vegetación. Luego el balance negativo nocturno disminuye esos valores de temperatura hasta producir daños.

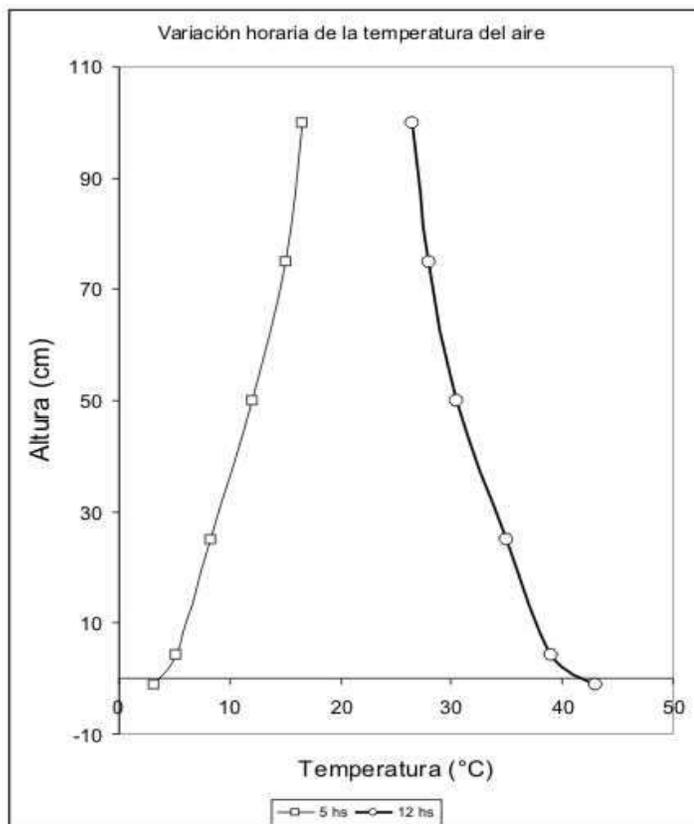


Figura 20.2: Variación horaria de la temperatura del aire con la altura. El horario de las 8 de la mañana (línea de la izquierda) muestra una inversión de temperatura.

La clasificación según los efectos visuales producidos al ocurrir el fenómeno da origen a las **HELADAS BLANCAS Y NEGRAS**. Sin embargo, en cuanto las consecuencias agrícolas de este tipo de heladas es el agricultor quien atribuye mayor daño o peligrosidad a las heladas negras.

La **helada blanca** o **escarcha**, ocurre cuando se forma hielo cristalino sobre la superficie de las plantas y objetos expuestos libremente a la radiación nocturna, si la temperatura desciende a los 0°C. En cambio, la **helada negra** es un fenómeno que ocurre cuando el descenso térmico por debajo de los 0°C no va acompañado de formación de hielo. Su designación obedece al color negro que adquiere, al día siguiente de la helada, los órganos verdes y tiernos de los vegetales.

Las heladas blancas ocurren cuando la temperatura mínima de las plantas es menor que la del punto de rocío de la masa de aire que la circunda. La helada negra, en cambio, tiene lugar cuando el punto de rocío de la masa de aire queda todavía por debajo de la temperatura mínima de las mismas.

#### 20.1.2.3 Condiciones que determinan la formación de la helada

Como ya se mencionó, la helada blanca o escarcha, se produce cuando el rocío se congela por haberse depositado sobre una superficie que acusa una temperatura igual o inferior a 0°C. Considerando como se origina la helada blanca, las condiciones que la determinan son las siguientes:

1. El grado de nubosidad.
2. La velocidad del viento.
3. Estratificación del aire.
4. La sequedad del aire, que posibilita una mayor irradiación de los objetos y plantas, y consecuentemente su enfriamiento.
5. La evapotranspiración, proceso que determina una pérdida apreciable de calor por los vegetales y el suelo. Para evapotranspirar un gramo de agua, el conjunto suelo-planta pierde, aproximadamente 600 calorías.

#### 20.1.2.4 Las heladas y la agricultura

El daño que produce la helada sobre el cultivo, depende principalmente del momento del ciclo vegetativo en el cual ésta ocurre. Por ejemplo, una helada que alcanza a registrar  $-4^{\circ}\text{C}$  durante una hora, en una especie criófila perenne, los daños que producirá en los distintos momentos son:

Momento del ciclo vegetativo	Daños observados
Reposo invernal	Absolutamente ningún daño
Botones florales cerrados y sin color	Ningún daño
Botones florales cerrados pero ya coloreados	Daños insignificantes
Plena floración	Merma de producción apreciable
Frutitos verdes desarrollándose	Pérdida prácticamente total

Los daños señalados son los que cabe esperar en la generalidad de los casos, ya que el daño puede ser aumentado o disminuido dependiendo de factores tales como el vigor de la planta, las condiciones meteorológicas precedentes, las propiedades físicas del suelo, etc.

En las plantas anuales, bianuales o perennes, que son cultivadas para aprovechar el fruto, se pueden establecer grados crecientes de daños por heladas:

1. El frío daña órganos vegetativos, tales como hojas y tallos, perturbando las funciones de los órganos restantes.
2. La helada destruye un gran porcentaje de flores, impidiéndose, así la fructificación.
3. la baja temperatura destruye los frutos en formación, y los que sobreviven resultan mal formados.
4. El frío, si es lo suficientemente intenso y prolongado, provoca la muerte de la planta completa.

#### 20.1.3 Métodos de protección de los cultivos contra los daños producidos por la helada.

Como las medidas de protección contra las heladas advectivas suelen ser ineficaces o de aplicación limitada, los métodos de protección son mas eficientes para las heladas de tipo de radiación. En las zonas en que se produce este tipo de heladas es posible eliminar o minimizar los daños mediante prácticas de manejo de suelo y variedades resistentes, y en condiciones de helada más extremas, mediante métodos artificiales.

Los métodos de protección contra las heladas pueden describirse como **métodos pasivos o activos**. Los métodos **pasivos** son aquellos que se basan en tratar de evitar el período de heladas. Estos métodos se aplican teniendo en cuenta un estudio preliminar agroclimático de heladas y de las condiciones del terreno. Los métodos **activos** se basan en las medidas artificiales aplicadas inmediatamente antes y durante la época de helada.

## 1. METODOS PASIVOS

**Ubicación de la zona de cultivo.** Si fuera posible, hay que evitar los lugares en los que haya riesgos de daños causados por las heladas. Esta información puede obtenerse mediante estudios climatológicos y microclimatológicos. Las informaciones sobre la frecuencia e intensidad de la helada pueden obtenerse analizando los registros climatológicos, mientras los efectos de la topografía mediante estudios microclimáticos.

En general, los mejores suelos para cultivar se hallan en los valles o en las praderas. Pero estos lugares pueden estar más sometidos a daños causados por las heladas que las pendientes o laderas adyacentes. Por ese motivo, muchas producciones se ubican en las laderas de las colinas y no directamente en los valles. Los árboles y arbustos que crecen a lo largo de una pendiente descendente o a lo largo de la orilla de un río pueden obstruir el flujo de aire frío y crear zonas de helada artificiales. Debe permitirse el drenaje de aire frío. Cerca de grandes cuerpos de agua, los riesgos de las heladas siempre son pequeños.

En lugares donde la helada predominante es de tipo radiativa (con ocurrencia de inversiones de temperatura) los cultivos de alto porte son los más adecuados. Cuando los cultivos se plantan en hilera, es aconsejable prestar atención al flujo de aire frío y asegurarse de que las hileras permitan el máximo drenaje de aire frío.

**Ciclo del cultivo.** Un factor importante en la producción de cultivos es el período libre de heladas. Conociendo la duración del ciclo del cultivo y del período libre de heladas, se podrá elegir las especies y variedades adecuadas para las zonas sometidas a los riesgos de las heladas. A partir de tales datos, pueden determinarse las fechas promedio seguras para la plantación/siembra.

**Elección de especies y variedades.** Para reducir los riesgos de daños causados por heladas, deberán seleccionarse y criarse especies y variedades que se desarrollen y maduren durante el período libre de heladas.

Como las variedades de temprano florecimiento son las más susceptibles a los daños producidos por las heladas, es necesario seleccionar y criar variedades que florezcan tardíamente, que serán las más seguras en las zonas donde las heladas tardías ocurran lo más próximas a las invernales. No obstante, las variedades de florecimiento tardío pueden resultar tan sólo una solución parcial al problema.

Además de la temperatura propiamente dicha, hay otros factores que también contribuyen a la extensión del daño, como son las condiciones externas previas y existentes, la velocidad de enfriamiento (un repentino descenso de temperatura puede causar más daño que un descenso gradual de la misma) y la duración de la exposición a una temperatura dada.

En este momento, la teoría más aceptable sobre los daños y muertes causados por las heladas es la formación de cristales de hielo en el interior y exterior de las células de las

plantas. En el estado latente, las plantas pueden resistir temperaturas menores de  $-20^{\circ}\text{C}$  sin sufrir daños, pero una vez iniciado el crecimiento, una temperatura que se halle unos pocos grados por debajo del punto de congelamiento puede resultar fatal. La savia de la célula es una solución sometida a presión y se congela a una temperatura levemente por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ . Pero el agua que se halla en los espacios entre las células puede ser puro o casi puro y, por lo tanto, se congela a una temperatura apenas menor de  $0^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, la condición de formación de hielo extracelular es la más común. A la formación de hielo extracelular le sigue el retiro del agua de la célula. El problema de la resistencia a la helada parece estar estrechamente relacionado con la capacidad de la planta para resistir los daños debidos a dicha formación de hielo extracelular.

**Manejo del suelo.** Durante una noche de helada típica, el suelo pierde calor por radiación. La velocidad de enfriamiento de la superficie del suelo depende de los factores que influyen sobre la pérdida de radiación, de la cantidad de calor almacenada en el suelo y la velocidad a la que se conduce el calor desde los estratos inferiores para reemplazar al que se perdió en la superficie del suelo. Como la temperatura mínima del aire está mayormente determinada por la temperatura de la superficie del suelo, es evidente que cualquier factor que afecte los procesos antes mencionados también afecta a la temperatura mínima de aire y por lo tanto a la intensidad de la helada.

Para una mejor protección contra las heladas, el suelo de un sistema productivo deberá estar húmedo, liso y con buena estructura. Esto implica que antes del período de peligro de las heladas, deberán irrigarse el suelo, sin permitir que se seque.

Al cultivar flores u otros cultivos, es aconsejable prestar atención al color y tipo de suelo. Cuando el suelo se halla relativamente seco, las diferencias de color afectan la cantidad de calor absorbida e irradiada durante la noche. Los suelos que contienen un alto porcentaje de arena se enfrían más rápidamente de noche que los suelos con arcilla.

**Otros métodos pasivos.** Hay evidencias que la aplicación de fertilizantes minerales en ciertos momentos puede aumentar la resistencia a la helada mejorando la nutrición mineral del árbol.

Las plantas en estado latente pueden resistir temperaturas muy bajas sin sufrir daños. Se ha utilizado este hecho para prolongar el estado de dormición o de reposo de las plantas, rociándolas con reguladoras de crecimiento, por ejemplo, hidrazida maleica, obteniendo así cierta resistencia al frío. Los experimentos demostraron que la inducción química del estado de reposo es un enfoque realista para obtener cierta resistencia al frío, pero además, provoca deformaciones de frutas y hojas, por lo tanto, reducción de rendimientos.

## 2. METODOS ACTIVOS

**Cobertura.** El método más sencillo y común para la protección contra las heladas es la cobertura. Este método es de difícil aplicación en producciones de árboles frutales o de cultivos que alcanzan gran altura.

La cobertura incluye el uso de diferentes sustratos o materiales, a saber: suelo, esterillas de paja, pasto seco, redes, pantallas de arcilla refractaria, etc, siendo los más utilizados las cubiertas de plástico y vidrio que permiten que la radiación de onda larga no escape fuera del sistema.

**Neblinas artificiales y neblinas químicas.** Es un sistema que reduce la radiación de onda larga saliente. Para la protección se utiliza el humo producido por diferentes materiales: madera, paja, aserrín, aceite, alquitrán, gasoil mezclado con naftalina, etc. También se han sido diseñados aparatos productores de nieblas y neblinas. Utilizan combustibles derivados del petróleo, pero tienen un gran poder contaminante.

**Máquinas de viento.** Son artefactos (ventiladores, y hasta helicópteros) que actúan mezclando el aire superior más caliente con las capas inferiores más frías, destruyendo así la inversión y elevando la temperatura de la capa de aire cercana al suelo en varios grados (Figura 8.3)

El éxito logrado con máquinas de viento depende de la intensidad de la inversión. En la protección contra las heladas, una fuerte inversión se considera aquella en la que la temperatura del aire a unos 15 m por encima del suelo es de 15°C más caliente que el aire que se halla a unos pocos cm por encima del suelo. Cuando la diferencia de temperatura es menor a 5°C, la inversión se considera leve. Una inversión leve limita la utilidad de las máquinas de viento para combatir las heladas. Con heladas de advección y heladas de radiación de inversión débiles, el uso de ventiladores será relativamente ineficaz. En tales condiciones se ha obtenido una mejor protección complementando las máquinas de viento con calefactores.

En las zonas de inversiones fuertes, donde la eficacia de las máquinas de viento ha quedado demostrada, los costos de protección pueden estimarse en función del valor del cultivo protegido. Si se experimentan temperaturas perjudiciales sólo una vez cada cuatro o cinco años, no se justifica el empleo de una máquina de viento.

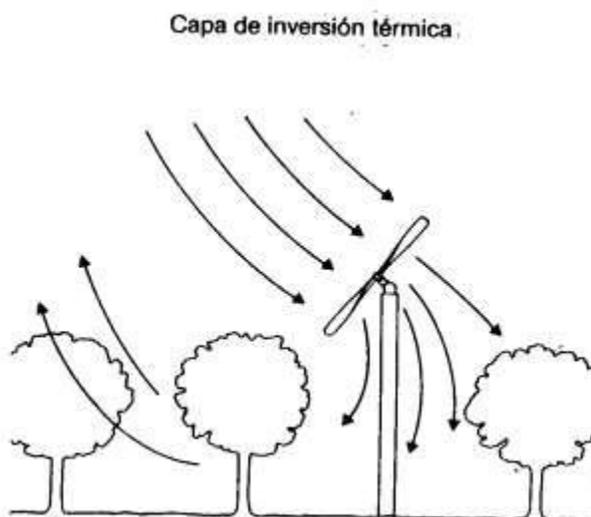


Figura 20.3: Maquinas de viento.

**Uso del agua.** El agua desempeña un papel importante en la lucha contra las heladas. Con la irrigación por surcos (Figura 8.4) se puede obtener una atenuación de las bajas temperaturas que ocurren durante una helada. El riego agua deberá aplicarse durante el día. En este caso se produce la absorción del calor por el suelo, y debido al efecto regulador del agua, la energía absorbida es liberada durante la noche en forma gradual.



Figura 20.4: Riego por surco.

En el método de aspersión la planta utiliza el calor latente de fusión, que se libera cuando el agua se enfría y se congela, y que reemplaza al calor que se pierde por radiación. Cuando un gramo de agua se congela se liberan 80 calorías.

Una de las ventajas del método de aspersión para la protección contra las heladas es que el equipo de riego disponible puede utilizarse con una modificación. Las gotas no deberán ser tan finas para que no se congelen antes de llegar a la planta. El sistema de aspersión deberá suministrar una lluvia completa y continua de agua. Un cese o interrupción de unos tan sólo pocos minutos podrá provocar la pérdida del cultivo.

No todos los cultivos y zonas son adecuados para la irrigación como método de protección contra las heladas. El exceso de agua en el suelo deberá tenerse en cuenta. En lugares donde la humedad relativa del aire es muy baja no es conveniente la aplicación de este método. En estos lugares la gran demanda atmosférica existente ocasiona la evaporación del agua de aspersión, lo que potencia la disminución de temperatura que ocurre durante una helada.

En la actualidad, la aspersión se considera como uno de los mejores métodos para la protección contra las heladas de los árboles frutales. Es cierto que requiere una gran inversión de capital que sólo puede justificarse en el caso de elevados ingresos de capital por unidad de suelo. Pero es eficaz, el costo de operación es bajo, es fácil de operar y los requerimientos de mano de obra son mínimos.

**Calefacción.** Uno de los métodos más prácticos, eficaces y económicos para prevenir los daños causados por las heladas es el de reemplazar el calor perdido por radiación mediante el calor emitido a través de calefactores o pequeñas hogueras. De este modo, puede mantenerse la temperatura en los predios por encima de la temperatura crítica para ese

cultivo en particular. En muchos lugares del mundo, la calefacción se ha convertido en una costumbre regular y bien organizada en los huertos de cítricos y frutos deciduos (Figura 8.5).

Aunque puede emplearse madera, carbón o carbón de leña, el combustible más utilizado para la calefacción es el dieseloil o gasoil. Pueden quemarse en contenedores adecuados o en calefactores de diferentes tamaños y construcción. Estos deberán distribuirse en forma bastante uniforme en la zona que debe protegerse. Es aconsejable colocar una gran cantidad de calefactores a lo largo del borde contra el viento y en las partes más frías de la zona a calefaccionar (Figura 8.6).

Para calentar el aire, varias hogueras pequeñas (4 a 20 litros) son más eficaces que pocas hogueras grandes (20 a 70 litros). Las hogueras grandes pueden provocar columnas de aire en rápido ascenso sin difundirse y suministrar la circulación necesaria para la correcta mezcla del aire más caliente y más frío.

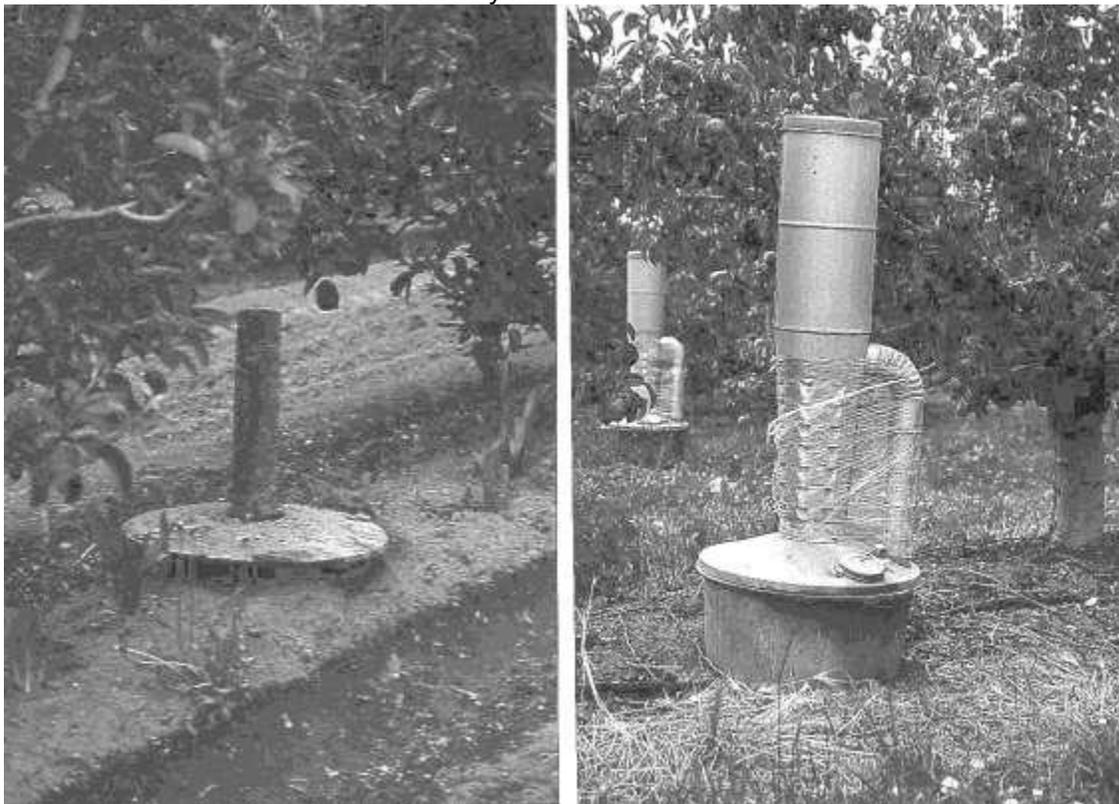


Figura 20.5: Tipos de calefactores



Figura 20.6: Posicionamiento de calefactores, en un monte frutal.

#### 20.1.4 Consideraciones finales de las tareas de prevención.

Las tareas de prevención se refieren a las condiciones generales en las que se pueden mantener los cultivos a fin de que sufran lo menos posible la pérdida de calor del suelo. Hay que tener en cuenta dos factores muy importantes: la humedad (húmedo o seco) y el estado del suelo (compactado o arado).

La pérdida de calor se favorece si el suelo está muy seco (Figura 15.3). Si en cambio el suelo está húmedo, se pierde menos calor, pues el vapor de agua retiene la radiación terrestre y no permite que se escape. Lo mismo sucede si el terreno está compactado: absorbe más calor y lo retiene mejor que el suelo arado por tener este último una mayor cantidad de aire.

Otros elementos que permiten minimizar la pérdida de calor del suelo son: ubicación del cultivo en áreas con un buen drenaje de aire frío, cortinas rompevientos (Alto Valle), cobertura de algunos cultivos con diferentes tipos de materiales (paja, plásticos, etc). Desde el punto de vista de la defensa activa puede mencionarse a la calefacción como el método más difundido. El uso de agua (aspersión y riego por manto) y de ventiladores son métodos que requieren una mayor inversión, por lo que su uso se justifica en producciones de alta rentabilidad.

## 21.2 GRANIZO

### 21.2.1 Introducción

La ocurrencia de granizo constituye uno de los fenómenos meteorológicos capaces de causar daños cuantiosos al deteriorar seriamente cosechas, edificios y medios de transporte. Actualmente están en estudio múltiples aspectos relacionados con la formación y ocurrencia del granizo. Algunos incluyen el uso de técnicas complejas como las aplicaciones del radar y el empleo de aviones para la toma de muestras "in situ".

Estas observaciones informan sobre la estructura y evolución de las nubes, pero no son suficientes por sí para interpretar los procesos que determinan la aparición de la precipitación sólida. Es decir, el estudio de la formación del granizo consiste en interpretar las condiciones que producen tormentas severas por medio de los procesos microfísicos que dan origen al meteoro.

### 21.2.2 Tormentas granizeras

Las tormentas convectivas están formadas por "celdas", definidas como una unidad dinámica caracterizada por una fuerte corriente ascendente. El granizo se forma en nubes de gran desarrollo vertical las que, por ejemplo en Mendoza, alcanzan hasta 10 km de altura. Estas nubes son en general cúmulonimbus y constituyen la etapa final de la evolución de las nubes convectivas. En la Figura 20.8 se observa un cúmulonimbus ya desarrollado, con su típico "yunque" en la parte superior. Estas nubes se extienden por término medio desde los 2 hasta los 12 km y precipitan como chubascos, a veces acompañados de granizo.

El radar proporciona uno de los métodos más eficaces para el estudio de las tormentas severas y su uso se ha generalizado desde los primeros estudios en la década del 50. Los ecos del radar permiten visualizar en tres dimensiones la distribución e historia de los elementos de precipitación, es decir, determinar en forma aproximada las regiones de la nube donde se forma el granizo, y seguir su evolución espacial y temporal.

### 21.2.3 Características de los granizos naturales

Dada la severidad de las tormentas convectivas, es difícil obtener información sobre las condiciones de crecimiento del granizo a través de medidas directas en la nube, aunque se han realizado algunas observaciones desde aviones con estructuras reforzadas. Las piedras de granizo son conglomerados policristalinos de hielo de tamaños mayores que 0.5 cm de diámetro. Generalmente son esféricos, aunque se observan algunas formas cónicas o discoidales. Su superficie externa puede ser irregular, con lóbulos y protuberancias. En la Figura 20.9 se muestra un lote representativo de una granizada producida en la ciudad de Córdoba. La mayor parte de los granizos tienen tamaños que oscilan entre 0.5 y 4 cm, habiéndose observado granizos de diámetro mayor a 7 cm.

El granizo, considerado como precipitación acuosa, se mide, previa fusión, como si se tratara de lluvia, es decir en mm. Es de suma importancia registrar el número de días con granizadas y la intensidad de las mismas.

### 21.2.4 Formación del granizo

En el interior de la nube, el aire asciende y se enfría. Como contiene vapor de agua, se satura y comienzan a formarse gotitas de agua, las que son arrastradas por las corrientes ascendentes. Al continuar el ascenso, en los niveles de temperaturas inferiores a 0°C algunas gotitas de agua se congelan y forman cristales de hielo. No obstante, esta transformación no es abrupta; las gotas pequeñas, de agua pura con aerosol atmosférico, pueden permanecer en estado líquido hasta -30°C. Se habla entonces de gotitas de agua sobreenfriadas. En consecuencia en las zonas en las que la temperatura varía entre -4°C y -30°C, la nube está formada por una mezcla de gotitas de agua y cristalitas de hielo.

Mientras el aire asciende, las gotitas de agua y los cristalitas de hielo pueden, al chocar entre sí, unirse y formar cristales y gotas de mayor tamaño. Las gotas mayores se congelan antes que las de menor tamaño y por ser más pesadas comienzan a caer con respecto a las más pequeñas, a las que barren y llevan consigo durante el descenso. Comienzan así el proceso de crecimiento del granizo por el choque y la congelación de gotitas sobreenfriadas.

Después de esta etapa, algunos granizos son pesados como para iniciar el descenso, a pesar de la resistencia de las corrientes ascendentes. Durante el pasaje por la parte inferior de la nube y en el trayecto hasta llegar al suelo, las piedras comienzan a fundir. Las más pequeñas pueden transformarse totalmente en agua, dando lugar a la formación de grandes gotas de lluvia, mientras que las de mayores tamaño sólo funden su capa externa y llegan al suelo en estado sólido.

### **21.2.5 Influencia de las condiciones geográficas**

Además de la latitud y altura, las condiciones topográficas parecen actuar sobre la frecuencia del granizo. Las localidades ubicadas a cierta distancia de las cadenas montañosas y a sotavento de los vientos dominantes acusan la tendencia a un aumento en la frecuencia de las granizadas.

Una particularidad del granizo es que, cualquiera que sea la región geográfica considerada, este meteoro jamás precipita en una misma oportunidad sobre grandes áreas territoriales.

### **21.2.6 Climatología**

Las tormentas graniceras se desarrollan generalmente por la tarde, durante la temporada de verano. Son más frecuentes en el interior de los continentes y en las latitudes medias ya que en los trópicos se presentan poco casos de cúmulus muy desarrollados y en las zonas frías tanto la humedad como la convección severa son limitadas. Por otra parte, los océanos no se calientan tanto como la tierra y esto inhibiría la formación de corrientes ascendentes fuertes, pero faltan datos sobre los océanos para asegurar con certeza la no ocurrencia de granizo.

En nuestro país las granizadas producen, casi todos los veranos, grandes daños en zonas agrícolas como las de las provincias de San Juan, Mendoza, Salta, Jujuy, Córdoba, Neuquén y Río Negro, entre otras (Figura 20.10). En la Figura 20.11 se observan los porcentajes de daños en la región pampeana en el cultivo de trigo, obtenidos mediante estadísticas de siniestros. Los mayores porcentajes de daños se encuentran en las provincias de Córdoba y La Pampa.

### **21.2.7 Lucha antigranizo**

El granizo ha concentrado los esfuerzos de numerosos científicos de todo el mundo para anular, o al menos reducir, los cuantiosos daños que causa anualmente en las áreas agrícolas. Las primeras prácticas de la lucha antigranizo consistieron en el uso de cohetes y cañones. En todos los casos, los resultados fueron dudosos, cuando no negativos.

Posteriormente, se buscó no tanto la eliminación del granizo sino más bien tratar de producir un mayor número de piedras pequeñas que reemplacen a las menos numerosas pero más dañinas piedras grandes. Para ello se recurrió a la siembra de nubes graniceras con núcleos gigantes de sal, pero no se obtuvieron resultados positivos.

En los últimos años se utilizaron para la siembra de nubes cristales de ioduro de plata. Este producto químico actúa convirtiendo las gotitas de aguas subenfriadas en cristales de hielo. Al disminuir el número de gotas de agua de la nube también se reducen las colisiones que aumentan el tamaño del granizo. Este método ha sido puesto en práctica por numerosos países, sin obtenerse aún pruebas concluyentes de su eficiencia.

Resumiendo, se puede decir que en la actualidad no se conoce un sistema seguro y económico para evitar la formación de granizo. El seguro es, en la actualidad, el recurso usado contra los daños producidos por el granizo.