



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

25

275

FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFIA



METODOLOGIA PARA OBTENER INDICES AGROCLIMATICOS.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE LICENCIADO EN GEOGRAFIA PRESENTA: MARIA DE LA PAZ MEDINA BARRIOS



FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1995

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Con amor a mi esposo Mario Arenas Bautista y
a mis hijos Mario Alberto y Juan Carlos Arenas Medina,
por su apoyo, paciencia y comprensión.

A la memoria de mi abuelita Enriqueta Cruz Mejorada por
todo el cariño , los cuidados y atenciones
que nos tuvo en vida .

A G R A D E C I M I E N T O S :

A mis padres: Carlos Medina Lara y María Martha Hilaria Barrios Cruz, con mucho cariño por el incansable apoyo que he recibido a través de mi formación académica, y de la que deseo se sientan orgullosos.

A mis hermanas: María del Carmen y Elizabeth, agradeciéndoles infinitamente todas las atenciones que ha recibido mi familia.

A mis sobrinos: Ulises Bandor y Helga Cecilia Penélope Barba Medina; Paola Edith, Isela Jazmín, Carla Elizabeth y Alfonso Josué Martínez Medina, espero que continúen superándose y brinden satisfacción a sus padres.

A mis compañeros y amigos del Colegio de Geografía, de la Facultad de Filosofía y Letras, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Doctor Juan Carlos Gómez Rojas y al Maestro Jaime Márquez Huitzil, por la enseñanza, apoyo y la generosa amistad que me han brindado.

Al Lic. Macario Arredondo, Lic. Carlos C. Morales y Lic. Miguel Cortéz Vázquez, por la revisión, comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo.

A mis compañeros y amigos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), especialmente :

Al Doctor José Francisco Villalpando Ibarra, por la enseñanza y preparación que recibí en el área de Agroclimatología.

Al Ingeniero Román de Jesús Barajas Carlos y al Doctor Rodrigo Aveldaño Salazar, por su apoyo durante mi permanencia en el Campo Agrícola Experimental Tecamachalco, en el estado de Puebla.

A la Bióloga Beatriz Eugenia Ortega Ramos y a María Luisa Maya, por sus buenos deseos y alentadoras palabras para poder realizar este trabajo, así como también por el reconocimiento que han hecho al mismo.

Al Doctor Rafael Moreno Sánchez, por brindarme la oportunidad de superarme y lograr mi meta.

A Paola Edith y Isela Jasmín Martínez Medina, por su apoyo mecanográfico, la revisión y edición final de este trabajo.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN	ix
INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	5
MATERIALES Y METODOS	6

Capítulo 1. Introducción a la agroclimatología.

1.1	Introducción.....	7
1.2	Tiempo y Clima.....	8
1.3	Conceptos.....	11
1.4	Diferencias entre la meteorología y la climatología.....	13
1.5	Definiciones de la agrometeorología y de la agroclimatología.....	14
1.6	Definiciones de ciencias afines a la agrometeorología y de la agroclimatología.....	16
1.7	Ubicación de la agrometeorología como ciencia....	17
1.8	Alcance de la agrometeorología.....	19
1.9	Objetivos de la agrometeorología y de la agroclimatología.....	20
1.10	Aplicaciones de la agrometeorología y de la agroclimatología.....	21
1.11	Principios que rigen la distribución de los organismos.....	24
1.12	Perspectiva Geográfica de la Agroclimatología....	24

Capítulo 2. Características de las clasificaciones climáticas.

2.1	Introducción.....	30
2.2	Elementos y factores que influyen en las clasificaciones climáticas.....	31
2.3	Clasificaciones de los Climas.....	32
2.4	Temperatura y precipitación como elementos climáticos de clasificación.....	38
2.5	Clasificaciones climáticas que usan la precipitación y la evapotranspiración como factores taxonómicos.....	43
2.6	Clasificaciones climáticas basadas en la duración de humedad disponible en el suelo.....	49

2.7	Clasificaciones para evaluar el potencial climático para agricultura.....	51
2.8	Clasificaciones para uso en la transferencia de tecnología.....	53
2.9	Representaciones gráficas de la información climatológica.....	53
2.10	Sequía intraestival.....	62

Capítulo 3. Practicas agrometeorológicas y presentación de la información estadística.

3.1	Introducción.....	64
3.2	Importancia de las practicas agrometeorológicas..	65
3.3	Función de la comisión de Meteorología Agrícola (CMAg).....	66
3.4	Componentes de la meteorología agrícola.....	67
3.5	Colaboración entre la meteorología y la agricultura.....	69
3.6	Presentación de la información estadística de acuerdo a la CMAg.....	71
3.7	Análisis estadístico de los datos agrometeorológicos.....	77
3.8	Métodos estadísticos.....	79
3.9	Publicaciones de los resultados.....	83

Capítulo 4. La radiación solar en el crecimiento y desarrollo de la vegetación.

4.1	Introducción.....	85
4.2	Conceptos.....	85
4.3	Características del espectro solar.....	87
4.4	Efecto de la atmósfera sobre la radiación.....	89
4.5	Efecto de la atmósfera en la radiación solar.....	90
4.6	Efecto de la superficie terrestre sobre la radiación.....	92
4.7	El balance de radiación.....	96
4.8	Efecto general de la radiación sobre los organismos.....	97
4.9	Variación temporal y distribución geográfica de la radiación solar.....	99
4.10	Fotoperiodicidad.....	105
4.11	Estimación de la radiación solar.....	109

Capítulo 5. La temperatura en el crecimiento y desarrollo de la vegetación.

5.1	Introducción.....	113
5.2	Influencia de la temperatura en el desarrollo y crecimiento de la vegetación.....	114

5.3	Indices agroclimáticos derivados de la temperatura:	
5.3.1	Constante térmica.....	121
5.3.2	Unidades fototérmicas.....	134
5.3.3.	Horas frío.....	137
5.3.4	Horas sobre 18°C.....	148
5.3.5	Unidades frío.....	148
5.4	Índice auxígeno e índice tanotoclimático.....	152

Capítulo 6. Importancia de la precipitación en el desarrollo y crecimiento de la vegetación.

6.1	Introducción.....	154
6.2	Componentes y procesos generales.....	154
6.3	La humedad del aire.....	155
6.4	La precipitación.....	160
6.5	Características de la precipitación en los trópicos.....	162
6.6	Cálculo de probabilidades de lluvia.....	164
6.7	Metodologías para el cálculo de probabilidades de lluvia.....	173

Capítulo 7. Evaporación y Balance Hídrico.

7.1	Introducción.....	184
7.2	El agua en el suelo.....	185
7.3	El Balance Hidrológico.....	193
7.4	Estimación de Balances Hídricos.....	194
7.5	Cálculo de la evapotranspiración potencial y balance hídrico.....	195
7.6	Metodologías para estimar los componentes del balance hídrico.....	201
7.7	Cálculo del balance de humedad.....	214

Capítulo 8. Riesgos meteorológicos para la vegetación.

8.1	Introducción.....	222
8.2	Efectos de los fenómenos meteorológicos para la vegetación.....	222
8.3	Cálculo de probabilidades de fenómenos meteorológicos.....	229
8.4	Influencia del microclima sobre la incidencia de plagas y enfermedades de los cultivos.....	248
8.5	Efectos de los elementos climáticos en la vegetación.....	249

Capítulo 9. Determinación de la aptitud agroclimática de una región.

9.1	Introducción.....	256
9.2	Estudios de aptitud agroclimática.....	257
9.3	Aspectos generales sobre el proyecto de zonas agroecológicas.....	260
9.3.1	Inventario climático.....	263
	Divisiones climáticas.....	263
	Períodos de crecimiento.....	268
9.3.2	Inventario edáfico.....	276
CONCLUSIONES		282
LITERATURA CITADA		290
ANEXO		296

INDICE DE FIGURAS

1.1	Ubicación de la Agroclimatología en relación con la Agrofísica.....	17
1.2	Relaciones de la Agrometeorología con otras ciencias.....	18
1.3	Definición Esquemática de la Agroclimatología.....	19
1.4	Variabilidad de los Componentes del clima y su relación con la Agroclimatología.....	27
1.5	Perspectiva Geográfica de la Organización del Espacio.....	28
1.6	Interrrelaciones del Espacio Geográfico de la Agroclimatología.....	29
2.1	Diagrama para la Clasificación de Zonas de vida o formaciones vegetales del mundo.....	42
2.2	Climograma para Catalaõ, Brasil.....	54
2.3	Climadiagrama Modelo.....	56
2.4	Climograma de Thornthwaite, para la estación Zapopan, Jalisco.....	60
2.5	Climadiagrama de la Laguna de Fresno. Michoacan...	63
4.1	Distribución espectral de la medición de un Cuerpo Negro con una Temperatura superficial de 6000 °K (sol), 1000° (fuego), 287°K y 231°K (tierra caliente y fría respectivamente).....	86
4.2	Distribución de la Radiación en la Atmósfera.....	90
4.2.a	Distribución de la intensidad relativa de la radiación solar según longitud de onda.....	92
4.3	Relación entre la tasa de absorción de la luz por la clorofila a y b, y las diferentes longitudes de onda del espectro luminoso.....	99
4.4	Angulo de los Rayos Solares y Altitud Solar.....	100
4.5	Aprovechamiento de la Radiación Solar según el ángulo de incidencia de los Rayos Solares.....	101
4.6	Situación idealizada de la incidencia de los Rayos Solares sobre la Tierra.....	102

4.7	Traslación anual de la tierra alrededor del sol y formación de estaciones del año.....	103
4.8	Radiación solar en Langleys recibida en una superficie fuera de la atmósfera en función de la latitud.....	104
5.1	Temperaturas cardinales (T.C.) y temperaturas letales (T.L.).....	128
5.2	Método Termofisiológico para calcular la Constante Térmica.....	128
5.3	Método de los Triángulos para calcular la Constante Térmica.....	130
5.4	Método de los Trapecios para calcular la Constante Térmica.....	130
5.5	Termofases.....	131
5.6	Marcha Anual de la temperatura del aire y clasificación de los cultivos según su termoperiodismo anual.....	133
5.7	Acumulación de frío registrada por el método convencional en termógrafo.....	139
5.8	Relaciones físico-químicas en los caducifolios....	144
5.9	Etapas de inactividad de crecimiento en árboles frutales del tipo templado, reguladas por condiciones externas (latencia) o internas (reposo).....	145
5.10	Descripción esquemática de los cambios en respiración y hormonales, en relación al reposo.....	146
5.11	Acumulación diaria de frío para diferentes localidades ("A" o "B").....	149
5.12	Relación entre la temperatura al Abrigo (A) y la Temperatura de la Yema (B) y las Unidades Frío Acumuladas para Frutales Caducifolios.....	150
6.1	Transformación del estado físico del agua y absorción o liberación de energía en los diferentes procesos.....	156
6.2	El ciclo hidrológico en la naturaleza.....	157
6.3	Relación entre la Temperatura del aire y su capacidad de retención de agua.....	158
6.4	Gráfica de valores de lluvia total de julio y prueba de recorrido (run test) para la estación climatológica de Cuquio, Jalisco.....	170
6.5	Distribución Acumulativa de lluvia para el periodo de 80 días (55 días antes y 25 días después del jiloteo del maíz) en Aldama, Guanajuato.....	177
6.6	Cálculo de Probabilidades de lluvia mediante el uso de papel probabilístico normal.....	179
7.1	Componentes del movimiento del agua en el suelo...	186
7.2	Curvas de tensión de un suelo arenoso (A), uno limoso (B) y uno arcilloso (C).....	188
7.3	Curva única de Hansen para el cálculo de los coeficientes de desarrollo.....	212
7.4	Representación Esquemática de diferentes técnicas para medir la humedad del suelo.....	216

7.5	Probabilidades de tener días con sequía en una estación de crecimiento para varias capacidades retención de humedad.....	218
8.1	Definiciones gráficas de la primera y la última helada.....	232
8.2	Período libre de Heladas.....	233
8.3	Probabilidades de heladas o grados centígrados....	235
8.4	Distribución del Número de días con Heladas a través del año	236
8.5	Información básica para generar las fechas de la primera y última helada y el PLH.....	237
8.6	Gráficas de distribución acumulativa y normal de última y primera Heladas, para la estación climatológica de Cuquió, Jalisco.....	242
8.7	Gráfica para pronosticar la posibilidad de helada nocturna usando un Psicrómetro al atardecer.....	243
8.8	Gráfica para pronosticar la posibilidad de helada usando un termómetro	244
8.9	Representación gráfica de la frecuencia de las direcciones del viento.....	247
8.10	Determinación de la dirección del viento y su frecuencia.....	248
9.1	Procedimiento para evaluar la Aptitud de las Tierras.....	264
9.2	Divisiones climáticas para México.....	270
9.3	Período de crecimiento	271
9.4	Tipos de períodos de crecimiento.....	272
9.5	Gráficas de los períodos de crecimiento de cuatro estaciones de la Republica Mexicana.....	274
9.6	Procedimiento para estimar los períodos de crecimiento para México.....	276

INDICE DE CUADROS

2.1	Clasificación de Holdridge para las formaciones vegetales.....	41
2.2	Categorías de Humedad según el índice mensual IDH propuesto por Hargreaves.....	48
4.1	Composición de la Radiación Solar.....	88
4.2	Absorción diferencial de energía por los componentes de la atmósfera.....	91
4.3	Valores de Albedo de acuerdo a la superficie incidente.....	94
4.4	Valores típicos de albedo superficial y emisividad.....	95
4.5	Calidad y efectos de la radiación solar sobre las plantas.....	108
4.6	Relación aproximada de nubosidad n/N.....	111
5.1	Temperaturas aproximadas mínimas y óptimas para crecimiento y desarrollo de varios cultivos.....	123

5.1.A	Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) requeridas por los cultivos...	127
5.2	Valores de H y L para el calculo de la constante térmica por el método de Thom.....	132
5.3	Método de Horas frío de Sharpe.	142
5.4	Comparación de los diversos métodos de cálculo de horas frío para Ciudad Universitaria. D.F.....	143
5.5	Conversión de varios valores de temperatura horaria a unidades frío.	151
5.6	Características de los grupos de cultivos propuestos por la FAO.....	153
6.1	Prueba de recorrido (Run Test), para la serie climática de totales de lluvia del mes de julio de la estación climatológica de Cuquío, Jalisco..	171
6.2	Tabla de distribución del número de recorridos o cambios (U) y el intervalo para (U), para probar si la serie climática es homogénea.....	172
6.3	Frecuencia acumulativas para totales de lluvia de un período de 80 días en la estación climatológica de Aldama, Guanajuato.....	175
6.4	Logaritmos naturales de los datos de lluvia registrados para ser usados en la distribución gamma.....	183
7.1	Infiltración del Agua en terrenos con diferentes coberturas.....	187
7.2	Relación entre precipitación, intensidad y escorrentía.....	191
7.3	Diferentes autores y factores que usaron para la estimación de la evapotranspiración.....	204
7.4	Coefficiente (kp) de tanque evaporimetro clase a para diferentes cubiertas de suelo, niveles de humedad relativa promedio y 24 horas de recorrido.....	205
7.5	Duración media diaria de insolación máxima posible en horas (N) para diferentes meses y latitudes.....	208
7.6	Radiación solar sobre una superficie horizontal al límite de la atmósfera.....	209
7.7	Coefficientes de cultivo (kc) para varios cultivos en diferentes etapas de desarrollo y condiciones climáticas prevalentes.....	213
7.8	Rango aproximado de Evapotranspiración Real de algunos cultivos en mm.....	214
7.9	Ejemplo del calculo del balance de humedad del suelo para la estación de crecimiento.....	217
7.10	Estimación de balance de humedad e índice de sequía (I) para frijol en Pabellón, Ags.....	221
8.1	Distribución acumulativa para el calculo de probabilidades de ocurrencia de primera y ultima helada de los datos climáticos de la estación de Cuquío, Jalisco.....	240
8.2	Probabilidades de primera y ultima heladas de acuerdo a una distribución normal ajustada a la serie histórica de datos de temperatura (0°C) de la estación climatológica de Cuquío, Jalisco..	241

8.3	Efecto de los elementos climáticos sobre algunas enfermedades.....	253
8.4	La luz como factor que afecta al desarrollo de enfermedades.....	254
9.1	Climas Mayores.....	266
9.1.A	Grupos de adaptabilidad de cultivos, en base a la forma fotosintética y respuesta a la radiación y temperatura.....	267
9.2	Datos utilizados en el cálculo del período de crecimiento en cuatro estaciones de la República Mexicana.....	273
9.3	Clasificación agroclimática de cultivos.....	278
9.4	Calificaciones de las unidades de suelos por cultivos.....	278
9.5	Modificaciones por fases.....	280
9.6	Pendientes óptimas y marginales por cultivo y nivel de inversión.....	281

RESUMEN

El presente trabajo se ha realizado con la finalidad de que sirva como material de consulta, para tal fin se ha realizado una extensa revisión bibliográfica y se han respetado los ejemplos de la fuente original en la medida posible.

En primera instancia se proporciona un marco de referencia general de los conceptos básicos de los que se ha partido.

En cuanto a las clasificaciones climáticas se mencionan las características principales de ellas, y se presentan las fórmulas que han servido de base para tales clasificaciones.

Posteriormente se dan las bases que marca la Organización Meteorológica Mundial, para realizar las prácticas agrometeorológicas adecuadas.

Los capítulos siguientes cubren ampliamente los elementos climáticos que ejercen una marcada influencia en el desarrollo y crecimiento de la vegetación.

También se han considerado los fenómenos meteorológicos que afectan el desarrollo de las plantas en determinado momento de su estación de crecimiento, causando la mayoría de las veces pérdidas en la producción agropecuaria y forestal, poniendo en riesgo la situación económica de México.

En la última parte, se presenta la forma de evaluar la aptitud agroclimática de cualquier sitio, el uso de ésta metodología es práctica y es la forma de estandarizar el potencial agroclimático de una región y a la vez identificar las zonas de riesgo agroclimático, lo que permite en determinado momento la introducción de las especies más adecuadas al sitio seleccionado.

El conocimiento de los elementos y factores, tanto climáticos como meteorológicos, nos ayudan a comprender el medio ambiente, y a la vez nos permite tomar las precauciones adecuadas para evitar tener que enfrentarlos.

INTRODUCCION

A diferencia de las plantas, que deben adaptarse a las condiciones ecológicas y de los animales que deben migrar buscando las mejores condiciones para su desarrollo, el hombre tiene la posibilidad de modificar el medio para adaptarlo a sus necesidades.

Desde que el hombre empieza a producir sus propios alimentos, comienza a modificar el ecosistema, buscando optimizar el uso de los recursos disponibles.

Estos recursos bióticos constituyen la flora y la fauna, que el hombre, en los lugares que él destina a la producción, va sustituyendo por otros que por su cantidad o su calidad, satisfacen mejor sus necesidades.

En este conjunto de modificaciones se encuentra el mejoramiento genético, como así mismo, el traslado de especies de una región del planeta a otra con condiciones ecológicas similares o mejores.

Dentro de este contexto entendemos por recursos abióticos básicamente el suelo y el clima. La modificación de estos recursos, así como el conocimiento de ellos, llevara a una mejor planeación y aprovechamiento de los recursos agropecuarios y forestales.

La influencia que tiene el clima en el desarrollo y la producción de plantas y animales, tiene grandes repercusiones económicas que se deben considerar.

La planificación del uso adecuado de la tierra implica la correcta elección, tanto de la actividad agropecuaria como de las técnicas de manejo, correspondientes, basándose en el conocimiento de los hechos físicos, biológicos y sociales del ambiente.

En este sentido, la agroclimatología estudia las características ecológicas de las regiones y las necesidades climáticas de los organismos vivos para optimizar el uso de los recursos naturales.

Las condiciones bioclimáticas de un determinado lugar deben ser caracterizadas, de tal manera que permitan evaluar la adaptación de un sistema dado, basándose en sus necesidades específicas.

La caracterización debe ser hecha en términos que permitan establecer una relación entre las necesidades del sistema y las disponibilidades bioclimáticas.

Entre los aspectos que revisten gran importancia en el crecimiento y desarrollo agropecuario y forestal, se encuentran los elementos meteorológicos (radiación, precipitación, temperatura, evaporación, viento, etc), cuya evaluación se realiza por medio del material y equipo meteorológico.

Nuestro país se caracteriza por la presencia de una amplia diversidad de condiciones agroecológicas, con predominio de temporal (aproximadamente 85% de la superficie nacional), la producción agropecuaria es muy variable debido principalmente a las fluctuaciones climáticas, que ocurren año con año y que la afectan, como son las sequías, las heladas, el granizo, las inundaciones y otros fenómenos climatológicos.

Para desarrollar una tecnología enfocada a incrementar y estabilizar la producción agropecuaria y forestal en áreas de temporal, hay que considerar como requisito el entendimiento de la variación en tiempo y espacio de los diferentes elementos climatológicos que afectan el rendimiento de los cultivos. Por lo que es importante conocer, desarrollar e instrumentar métodos adecuados para caracterizar el clima y su impacto sobre la producción agropecuaria y forestal.

Los datos obtenidos en las estaciones meteorológicas son de vital importancia, debido a la extensa aplicación de la información que de ellos se obtiene; analizadas y conocidas las leyes que rigen el fenómeno, pueden aplicarse en la defensa y aprovechamiento de los recursos naturales de una región.

La presentación de la metodología para obtener índices agroclimáticos tiene la finalidad de dar a conocer la utilidad de los elementos meteorológicos y climáticos en algunos campos de la actividad humana, para tal fin se han seleccionado las metodologías más prácticas y comunes en la obtención de índices agroclimáticos.

Por otra parte se debe considerar que los datos mencionados son sólo algunos de los que se utilizan en la obtención y cálculo de índices agroclimáticos y factores meteorológicos, teniendo un sin número de variables de aplicación.

La necesidad de este tipo de estudios es inmediata, debido a que los problemas del campo como los urbanos, son tan numerosos que sólo algunas emergencias relacionadas con el clima, tales como las relativas a las tormentas de polvo

La caracterización debe ser hecha en términos que permitan establecer una relación entre las necesidades del sistema y las disponibilidades bioclimáticas.

Entre los aspectos que revisten gran importancia en el crecimiento y desarrollo agropecuario y forestal, se encuentran los elementos meteorológicos (radiación, precipitación, temperatura, evaporación, viento, etc), cuya evaluación se realiza por medio del material y equipo meteorológico.

Nuestro país se caracteriza por la presencia de una amplia diversidad de condiciones agroecológicas, con predominio de temporal (aproximadamente 85% de la superficie nacional), la producción agropecuaria es muy variable debido principalmente a las fluctuaciones climáticas, que ocurren año con año y que la afectan, como son las sequías, las heladas, el granizo, las inundaciones y otros fenómenos climatológicos.

Para desarrollar una tecnología enfocada a incrementar y estabilizar la producción agropecuaria y forestal en áreas de temporal, hay que considerar como requisito el entendimiento de la variación en tiempo y espacio de los diferentes elementos climatológicos que afectan el rendimiento de los cultivos. Por lo que es importante conocer, desarrollar e instrumentar métodos adecuados para caracterizar el clima y su impacto sobre la producción agropecuaria y forestal.

Los datos obtenidos en las estaciones meteorológicas son de vital importancia, debido a la extensa aplicación de la información que de ellos se obtiene; analizadas y conocidas las leyes que rigen el fenómeno, pueden aplicarse en la defensa y aprovechamiento de los recursos naturales de una región.

La presentación de la metodología para obtener índices agroclimáticos tiene la finalidad de dar a conocer la utilidad de los elementos meteorológicos y climáticos en algunos campos de la actividad humana, para tal fin se han seleccionado las metodologías más prácticas y comunes en la obtención de índices agroclimáticos.

Por otra parte se debe considerar que los datos mencionados son sólo algunos de los que se utilizan en la obtención y cálculo de índices agroclimáticos y factores meteorológicos, teniendo un sin número de variables de aplicación.

La necesidad de este tipo de estudios es inmediata, debido a que los problemas del campo como los urbanos, son tan numerosos que sólo algunas emergencias relacionadas con el clima, tales como las relativas a las tormentas de polvo

(tolvaneras), las inundaciones, las sequías, granizadas o la contaminación del aire reciben una cierta atención por parte de las autoridades.

La agroclimatología es una ciencia que contribuye en forma significativa en la producción de alimentos y en el uso más racional de los recursos naturales. Entre las áreas de mayor aplicación se mencionan la evaluación de recursos agroclimáticos regionales, análisis del clima en relación con programas operativos, modificación artificial del microclima de plantas y animales.

Una evaluación de los recursos agroclimáticos regionales, involucra el análisis estadístico de la información histórica de los diferentes elementos climáticos, así como la investigación de la fenología y fisiología de los cultivos agrícolas y variedades mejoradas. Los parámetros óptimos y/o mínimos climáticos, meteorológicos, edáficos y ambientales dentro del suelo, así como los requerimientos estacionales hidrológicos y climáticos, las limitaciones agroclimáticas para el crecimiento y fructificación vegetal, sus interrelaciones y analogías, solo es posible conocerlas a través de la investigación y experimentación en el campo y con el apoyo de las estaciones climatológicas.

En la actualidad la aplicación más frecuente de la agroclimatología en la República Mexicana, es en proyectos de desarrollo agrícola, en las que se pretende abrir al cultivo zonas de las que no se tienen antecedentes agrícolas locales.

En la República Mexicana hay organizaciones nacionales que se ocupan de la meteorología agrícola, de la agrometeorología y de la agroclimatología.

El servicio Meteorológico Nacional (SMN), colabora básicamente con el aporte de información meteorológica y climatológica útil al desarrollo agropecuario y forestal.

La Comisión Nacional del Agua, con sus oficinas y departamento de Hidrología y Agroclimatología se ocupan del aspecto ejecutivo y operativo (aunque también realizan estudios), de los programas agrometeorológicos en general y de cubrir los puntos relativos a la meteorología agrícola en todo el país.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), es el principal encargado de realizar investigaciones y estudios agrometeorológicos en el país, a través de la Red Relación-Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (RASPA).

Por otra parte algunas universidades del país, entre ellas la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) y el Colegio de Postgraduados de Chapingo (CPCH), realizan investigaciones y estudios agrometeorológicos y agroclimáticos, aunque como es lógico, tienen un carácter académico, con el objetivo de formar a futuros profesionistas con la especialidad en **agroclimatología**.

Por lo que este documento va dirigido principalmente a investigadores relacionados con la agroclimatología, como son: **Geógrafos, Agrónomos, Pecuarios, Forestales, Biólogos, Fitopatólogos, Arquitectos, Profesores Agropecuarios y Técnicos Agropecuarios.**

OBJETIVOS

Objetivo General

Dotar de un documento de consulta a posibles usuarios de la información climatológica y que resuelva las dudas que puedan existir al aplicar cada una de las metodologías mencionadas en la obtención de índices agroclimáticos.

Objetivos Particulares

A) Revisar las metodologías para elegir las más adecuadas para estimar los índices agroclimáticos.

B) Ejemplificar el uso de la metodologías más prácticas y más comunes, en los estudios agroclimáticos.

C) Demostrar las herramientas básicas para realizar una zonificación agropecuaria y forestal.

D) Hacer ver la utilidad de convertir los datos de los elementos climáticos a índices agroclimáticos.

E) Hacer ver la utilidad del manejo de tablas, gráficas y mapas agroclimáticos, en la identificación del potencial agropecuario y forestal de una región.

F) Ejemplificar la reducción de la cantidad de datos originales a rangos que puedan ser manejables por diversos usuarios.

G) Mostrar la influencia de las condiciones del tiempo sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas y animales.

H) Conocer la utilidad de pronósticos de producción agropecuaria y forestal.

I) Hacer notar la necesidad de estudios previos en la introducción de especies y variedades a una región.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Los materiales utilizados han sido tomados de los ejemplos de la revisión bibliográfica, la mayoría de ellos ha utilizado la información que reportan las estaciones climatológicas del servicio meteorológico nacional de México, a excepción claro esta de la revisión de literatura extranjera.

Métodos

Las metodologías que han sido ejemplificadas, han sido seleccionadas por ser las más prácticas y comunes, además que han sido las que han sido aplicadas en un sin número de intentos de caracterizar agroclimáticamente una región. Se han utilizado por separado de acuerdo al elemento climático a estudiar.

Las variables principales han comprendido a la temperatura media, mínima y máxima; a la precipitación (lluvia, rocío, niebla, granizo), a la evaporación, a la nubosidad y al viento.

Estos parámetros son los comunmente registrados en las estaciones climatológicas y meteorológicas, por lo que se puede contar con la información histórica necesaria para ser utilizada en la estimación de índices agroclimáticos.

En los casos de escasos de datos o la carencia de los mismos se han estimado o derivado de algún otro elemento del clima, como es el caso por ejemplo de la radiación solar estimada a partir de la nubosidad.

CAPITULO 1

INTRODUCCION A LA

AGROCLIMATOLOGIA

1.1 Introducción

La producción agrícola todavía depende del tiempo atmosférico y del clima a pesar de los espectaculares progresos que la tecnología agrícola ha realizado en los últimos decenios.

El conocimiento de los recursos ambientales disponibles y de las condiciones previstas desde las capas situadas debajo de la superficie del suelo, pasando por la capa límite suelo-aire hasta llegar a los niveles inferiores de la atmósfera, permiten establecer directrices para tomar medidas estratégicas en lo que se refiere a la planificación a largo plazo de los sistemas agrícolas.

Como ejemplos típicos se pueden citar:

- La planificación de sistemas de riego.
- La elección de los programas de aprovechamiento, y cultivo de las tierras.
- La selección de cultivos y animales, variedades y razas.
- La elección de la maquinaria agrícola.

La detallada estimación en tiempo real de los elementos meteorológicos y de los índices agroclimáticos reducidos a escalas más prácticas, son de importancia para las providencias tácticas que han de tomarse en la planificación a corto plazo de las operaciones agrícolas.

En las resoluciones tácticas se incluyen las que implican gastos medios referentes a las fechas en que han de realizarse determinadas prácticas agrícolas, tales como la siembra, cultivo y recolección, y por otra parte incluyen también las determinaciones que implican gastos importantes tales como el uso de productos químicos de elevado precio o la aplicación de costosas medidas de protección de los cultivos.

Cualquiera que sea el tipo de decisión que se tome es necesario tener un conocimiento adecuado de los efectos que el tiempo atmosférico y el clima ejercen en el suelo, en las plantas y en la producción agrícola para poder utilizar con eficacia la información meteorológica y climatológica .

La aplicación práctica de estos conocimientos va unida a la disponibilidad y precisión de predicción meteorológica o de la evolución de las condiciones del tiempo que han de producirse en un corto período.

Aún no se dispone con carácter habitual de predicción meteorológica segura a largo plazo. Ya que ninguna predicción puede ser completamente segura y menos largo plazo.

La principal función de la actual meteorología agrícola a escala mundial es garantizar que los investigadores, los planificadores y las personas encargadas de tomar los acuerdos, dispongan de datos meteorológicos adecuados, y una atención oportuna, a fin de que puedan hacer frente a gran variedad de problemas relacionados con la producción agrícola.

Se debe dar especial atención a las necesidades de las comunidades en desarrollo cuando trata de evaluar sus recursos climáticos y de facilitar servicios a la agricultura. En los países desarrollados han alcanzado un elevado nivel de eficacia los servicios de predicción y asesoramiento que se facilitan a los agricultores. Por el contrario, en numerosos países en vías de desarrollo dichos servicios se hallan sólo en una fase embrionaria y con frecuencia no existen. Esta deficiencia puede ser eliminada mediante una formación profesional del personal en todos los niveles y una participación más activa de los agrometeorólogos.

1.2 Tiempo y Clima

El clima es la manifestación a largo plazo de las variables atmosféricas en el ambiente húmedo, temperatura, luz solar, viento y presión atmosférica, y cuya manifestación diaria constituye el "tiempo atmosférico". En cualquier localidad dada, estas variables atmosféricas se modifican cada una en mayor o menor grado de acuerdo con la zona geográfica, la topografía, la proximidad a las cordilleras montañosas, los grandes volúmenes de agua o las corrientes oceánicas, los suelos, la vegetación, el hombre y el tiempo.

Se entiende por tiempo, el estado atmosférico presente durante un lapso breve o en un instante determinado. Se puede decir, por ejemplo, que en un momento dado hay un buen tiempo; ayer el tiempo se mantuvo ventoso; el tiempo de los últimos tres días fue muy seco; el tiempo durante el año pasado se manifestó muy lluvioso, etc.

El término "tiempo atmosférico" se vincula siempre a un estado atmosférico transitorio que puede ser normal o no, para la localidad o región considerada.

Los elementos fundamentales del tiempo son:

- radiación solar
- temperatura
- presión atmosférica
- viento
- evaporación
- humedad del aire
- nubosidad
- precipitaciones (lluvia, nieve, granizo, etc.)
- fenómenos eléctricos
- fenómenos ópticos, acústicos, etc.

En las estaciones meteorológicas de observación, por medio de instrumentos adecuados, se procede a valorar y registrar los distintos aspectos de cada uno de los elementos del tiempo.

Los fenómenos meteorológicos, que caracterizan el estado atmosférico y reciben el nombre de elementos del tiempo, son los mismos que, al sucederse en el curso de los días, estaciones y años, constituyen los elementos del clima, cuyos valores sólo son susceptibles de ser calculados eficazmente cuando se dispone de observaciones practicadas, sin interrupción, durante varios años.

El clima, aún en un estado relativamente estático, es una entidad sumamente compleja que varía ampliamente de un lugar a otro. Se puede dibujar una línea aguda de demarcación entre las condiciones climáticas sobre el suelo y de aquella que prevalecen en él donde los movimientos de los gases están más o menos restringidos a los espacios de los poros entre las partículas y donde las relaciones internas se vuelven muy intensas. El clima es una expresión del efecto combinado de todos los elementos meteorológicos, cuya interacción genera los tipos climáticos. Sus causas deben ser buscadas en factores tales como la latitud, altitud, distribución de las masas continentales, y oceánicas, corrientes marinas, centro de presión y barreras orográficas.

El concepto de clima tiene una connotación temporal y espacial. Con respecto a la primera, el clima se refiere a las condiciones atmosféricas obtenidas como promedio de muchas observaciones realizadas en un período extenso de tiempo. También se le concede importancia a los valores extremos, considerados en su intensidad, periodicidad y frecuencia. La duración del período de observaciones necesario depende del ámbito de variabilidad de lugar a lugar, en sentido horizontal y vertical; depende que haya

sido necesario establecer los términos macroclima, mesoclima, y microclima, para dar precisión a las variaciones espaciales entre los distintos lugares considerados tanto en sentido horizontal, como vertical.

La división que puede hacerse en este aspecto es en macroclimas, microclimas, mesoclimas, clima del suelo.

Se entiende por Macroclima las condiciones generales y complejas de extensos territorios generadas por la circulación de las grandes masas de aire entre las superficies oceánicas y las superficies continentales. En este contexto se habla de climas tropicales, polares de un país o región.

El término amplio Macroclima, o simplemente clima, expresa variables atmosféricas en la masa del aire libre, sobre de la superficie de la tierra. En la práctica, éstas se miden a unos cuantos metros sobre el nivel del mar, e interpretan los datos reunidos bajo condiciones estandarizadas, con la precaución necesaria para evitar interferencias indebidas provenientes de objetos naturales o hechos por el hombre.

Se acostumbra reunir la información sobre temperatura precipitación, humedad relativa, viento, presión atmosférica, brillo solar, evaporación, etc., como máxima o mínima absoluta, o como media diaria, mensual o anual, proporcionando así un cuadro promedio del "tiempo atmosférico" o el clima para una localidad o región dada. Dichos datos, si están disponibles, pueden ser útiles para los agricultores en cada fase de su trabajo. Sin embargo, desafortunadamente las estaciones meteorológicas y climatológicas son escasas en países en vías de desarrollo y están situadas a distancias considerables, unas de otras, que sus resultados realmente expresan una serie de condiciones locales que pueden no ser típicas de otras localidades o de aquellas que se encuentran en áreas amplias.

El Mesoclima se refiere a las condiciones locales y depende de la topografía, altitud y vegetación. Así se habla, por ejemplo, del clima de un valle, de una ciudad, o de un bosque.

El Microclima se ha definido hacia el estudio de áreas y superficies pequeñas, que se distinguen de las aledañas, por sus características físicas, biológicas y climáticas.

El Clima del Suelo así como el Microclima trata de ámbitos reducidos y definidos. Generalmente describe la situación climática cerca del suelo. Abarca, por ejemplo, desde la condición climática generada por la sombra de un

árbol hasta aquella que se produce alrededor de una sola hoja.

Para aplicar resultados de las estaciones enfrentamos el problema de la escala climática, es diferente de aquel cuyas variables son medidas por los instrumentos meteorológicos. Esta diferencia se debe a que la actividad fotosintética, la transpiración y el sombreado mutuo de las plantas, lo mismo que la clase de cubierta del suelo, las condiciones de humedad, su hacinación y demás factores, crean una serie de climas especializados bastante distintos al de la parte superior.

Además de la naturaleza dinámica de dichas influencias modificantes sobre las variables atmosféricas en la zona de la planta, también pueden existir microclimas por el comportamiento errático de diversos factores, particularmente la precipitación pluvial. El resultado neto de esto es una diversidad desconcertante de condiciones dentro de áreas relativamente pequeñas, las cuales son difíciles de precisar. Sin embargo, éstas son más importantes para el agricultor en la obtención de sus cosechas, que el macroclima por sí solo.

Por ejemplo, los termómetros expuestos al nivel del suelo, y a la altura de una caseta meteorológica, frecuentemente revelan diferencias marcadas en la temperatura, durante la mitad del día y también en la noche. Las temperaturas del día, en una superficie expuesta al sol, pueden variar de 20°C a 30°C sobre las registradas por los instrumentos meteorológico a la sombra, mientras que la radiación del calor en la noche puede resultar en las lecturas superficiales menores en varios grados que en el aire quieto, a una altura de 1 m a 2 m.

Los ligeros cambios en la topografía entre parcelas adyacentes producen variaciones marcadas en la temperatura, el brillo solar y otros factores, en la zona de crecimiento de la planta. Estos ejemplos puntualizan la necesidad de una cuidadosa evaluación de las variables climáticas para reducir el error de la variaciones al mínimo tomando en consideración el terreno, el cultivo, los aspectos económicos y otros factores relativos.

A pesar de la naturaleza compleja del clima, las variables atmosféricas mayores son la humedad, la temperatura y la radiación solar.

1.3 Conceptos

La Climatología es la ciencia que estudia y describe los fenómenos atmosféricos a largo plazo. Tiene como

objetivo la caracterización climática de un determinado lugar, describiendo la frecuencia y posibilidades de repetición de series de eventos atmosféricos extremos, también se ocupa de la preparación de mapas climáticos típicos, para realizar esta labor, es necesario hacer observaciones a largo plazo.

La climatología o tratado de los climas, puede ser considerada tanto una de las ramas de la geografía física como de la meteorología.

La Meteorología es la ciencia que estudia, describe y evalúa las condiciones físicas de la atmósfera y los fenómenos físicos y dinámicos que en ella tienen lugar.

La metereología se dedica especialmente a la preparación de cartas meteorológicas y a la predicción del "tiempo atmosférico".

La Climatología Aplicada como su nombre lo indica, relaciona aspectos específicos de la climatología con los elementos de alguna ciencia particular.

Igualmente, la Meteorología Aplicada trata de aspectos prácticos de la metereología, por ejemplo:

- La Biometeorología, que incluye la reacción de los seres vivos a determinados cambios meteorológico, por ejemplo en Veterinaria es muy importante saber cuales son las condiciones meteorológica imperantes para tomar decisiones sobre la vegetación y la fauna.

- La Bioclimatología, considera también influencias de diferentes condiciones climáticas sobre la vegetación y la fauna.

- La Climatología Técnica, tiene que ver con algunos campos más específicos, con la energía, las construcciones, las técnicas de calefacción y de climatización urbana.

- La Aerología, es una ciencia que trata de describir las condiciones meteorológica y climatológicas de los estratos superiores de la atmósfera.

- La Fenología, es un parte de la Metereología y Climatología Aplicadas, en realidad es un instrumento metodológico que permite relacionar los cambios físicos de la atmósfera con los procesos periódicos de las plantas, tales como germinación, floración, fructificación, maduración. Se aplica tanto a las plantas silvestres como a las especies cultivadas que tengan respuestas fenológicas muy definidas en función de los cambios climático reinantes. Aún cuando existan elementos climáticos de mayor peso que otros, la respuesta de la planta obedece a estructuras o

conjuntos de elementos climáticos. De modo que la observación de un proceso fenológico, el inicio de la floración de una especie en un lugar dado, provee información sobre una estructura climática determinada. La fenología es, un valioso complemento de la climatología y está integrada en un sistema mundial de observaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

La Agroclimatología, también se considera como una parte de la climatología, aplicada a la descripción e interpretación de las relaciones del clima de las plantas, a la relación de los sistemas de producción agrícola, pecuaria, forestal y agroforestal con las condiciones de clima dominantes. Básicamente estudia los requisitos climáticos de las especies en cultivo y el clima de las áreas de producción agrícola, a fin de encontrar las más aptas para cada especie. Dentro de este campo, trata de determinar los índices agroclimáticos para las especies.

1.4 Diferencias entre la Meteorología y la Climatología

Las diferencias fundamentales entre estas dos ciencias son:

1) Amplitud del campo estudiado. La meteorología estudia toda la atmósfera, desde la superficie terrestre hasta su límite superior; la climatología sólo estudia las capas atmosféricas en contacto inmediato con la superficie terrestre.

2) Lapso de observaciones. La meteorología recurre con frecuencia y sin inconvenientes a observaciones aisladas o a series prefijadas de un mes, un trimestre, un año, etc; la climatología se basa para cumplir sus objetivos, en observaciones hechas regularmente durante un período de tiempo de varios años. Se ha fijado como mínimo un período de 30 años, aunque cabe aclarar que hay estudios climatológicas para períodos menores que el mínimo convencional.

3) El clima es el conjunto de la temperatura, la lluvia, el viento, etc.

4) Los valores meteorológicos, tales como los correspondientes a lluvia, humedad del aire, temperatura, velocidad del viento, etc., oscilan continuamente de un año para otro, pero la climatología se basa en datos promedios, resultantes de muchos años de observaciones regulares y continuas.

Dado que el valor promedio, por lo general, representa una abstracción, y las plantas viven de acuerdo con las

realidades de la atmósfera, desde el punto de vista de la climatología agrícola es más conveniente estudiar el clima sobre la base de la frecuencia e intensidad de cada uno de sus elementos: lluvia, viento, nubosidad, temperatura, etc.

5) El clima corresponde al estado de la atmósfera registrado no en cualquier nivel de la misma, sino sólo en las capas de aire en contacto inmediato con la superficie terrestre. Indudablemente si el clima que debe ser estudiado es el de un altiplano ubicado a 3000 metros sobre el nivel del mar, los fenómenos que deben analizarse serán aquéllos que se registren en la capa de aire de 20 m a 30 m de espesor que existe inmediatamente encima del Altiplano y que, en consecuencia, se extiende entre los 3000 m y 3020 m o quizá 3030 m de altitud.

De lo anterior se infiere, que la climatología utiliza datos registrados casi a ras del suelo. Esta particularidad de la climatología se pronuncia más en la climatología agrícola y así, por ejemplo, cuando se estudia el clima en relación a cultivos de escasa altura, el espesor de la capa de aire que interesa apenas puede ser de unos 20 a 50 centímetros dependiendo del cultivo o de la vegetación a evaluar.

Siempre que se habla del clima no hace falta especificar la fecha, mientras que ello es siempre imprescindible al referirse al tiempo. El tiempo, puede diferir mucho de un día a otro, o de un año a otro, pero el clima es más estable, pero temporalmente.

El estado del tiempo durante un lapso determinado; una hora, dos días, una semana, etc., se caracteriza por la presencia e intensidad de un conjunto de fenómenos meteorológicos, por lo general perceptibles, cada uno de ellos por nuestros sentidos.

Esos fenómenos meteorológicos, que en forma conjunta constituyen y caracterizan el estado del tiempo, aisladamente representan sus elementos.

1.5 Definiciones de la Agrometeorología y de la Agroclimatología

La agrometeorología, por otro lado, es una ciencia joven que nació con el siglo veinte; posteriormente, en los años cincuenta, se desarrolló hasta convertirse en una ciencia independiente. Sin embargo, todavía no está bien organizada y en consecuencia sus estudios se hallan en distintas ciencias como la fisiología, micrometeorología, etc. Esta falta de organización dificulta la utilización de

la información disponible, por parte de los trabajadores del sector agropecuario.

La agrometeorología se encarga de estudiar el efecto que tienen los elementos del tiempo en el comportamiento de vegetales y animales, mientras que una de sus divisiones, la agroclimatología, estudia las relaciones de comportamiento de los elementos del clima contra las tendencias medias del crecimiento y producción de las plantas y animales.

Siguiendo una secuencia lógica con los anteriores conceptos se pueden emitir las siguientes dos definiciones:

Meteorología Agrícola o Agrometeorología. Es la ciencia que se encarga de estudiar las leyes y principios que relacionan los fenómenos meteorológicos con el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas cultivadas.

Climatología Agrícola o Agroclimatología. Es la ciencia que se encarga de estudiar las leyes y principios que relacionan los elementos y factores del clima con el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas cultivadas.

De Fina y Ravelo (1975), consideran que dado que actualmente los pronósticos o predicciones meteorológicas son a muy corto plazo (máximo 48 horas) y que su grado de precisión no es del todo satisfactorio, tiene más utilidad para la agricultura el estudio de las probabilidades de que duren eventos desfavorables para los cultivos. Este tipo de estudios se basaría lógicamente en estadísticas de los fenómenos meteorológicos. Es decir, que por el momento la agroclimatología tiene más utilidad práctica que la agrometeorología.

Azzi (1971), concuerda aproximadamente con la idea anterior al decir que a falta de predicciones a largo plazo, la agricultura no puede adaptarse al tiempo atmosférico, sino al clima.

Es clara la diferencia entre ambas disciplinas, pero también es claro que la agroclimatología surge de los análisis estadísticos de los datos agrometeorológicos, es decir, que sin el término agrometeorología se pueden englobar ambas disciplinas siempre y cuando se tenga presente lo anterior.

Algunas otras definiciones de meteorología agrícola son las siguientes:

Da Mota (1979). Define a la Meteorología Agrícola en su sentido más amplio: " es aquella rama de la Meteorología

Aplicada que investiga las repuestas de los organismos vivos al medio atmosférico".

- **Metereología Agrícola** en un sentido estricto, es la ciencia que estudia los procesos físicos de la atmósfera que producen el tiempo y sus relaciones con la producción agrícola.

Bourke, (s.f.). Define a la **Agrometereología** como la rama de la ciencia del tiempo cuya actividad consiste en ayudar a los agricultores, ganaderos, apicultores, hortelanos, silvicultores y a todos aquellos involucrados en el cultivo de plantas y en la cría de animales.

Mora, (1976). **Agrometereología** es la disciplina que relaciona el clima y sus elementos con el desarrollo de las plantas cultivadas.

Gómez, R., (1985). Define: " La **agroclimatología** es el estudio de la influencia del clima sobre las plantas cultivadas por los hombres y de la influencia recíproca de éstos según su grado de desarrollo económico-cultural, sobre el clima; ya sea aprovechándolo a modificándolo con fines agrícolas. "

1.6 Definiciones de ciencias afines a la Agrometeorología y a la Agroclimatología

Ecología Agrícola. Es la estudio del ambiente físico (clima y suelo), en relación con el desarrollo y rendimiento de las plantas cultivadas, desde los puntos de vista: cuantitativo (cantidad del producto), cualitativo (calidad del producto) y generativo (calidad de la semilla). Azzi, (1971).

Microclimatología. Se encarga de estudiar los microclimas; se entiende por "microclima" el clima de un espacio muy reducido, que puede llegar a ser el de una parcela, el de un local (invernadero), el del aire que rodea a un árbol o a una planta en particular, e inclusive el del aire que rodea a un órgano de una planta como la flor, el fruto, etc.

Agrotopoclimatología. Trata de las diferencias locales que presenta el clima, debido a características topográficas, de suelo y de vegetación que influye sobre la agricultura.

Agrofenología Vegetal. Estudia las fechas y épocas de ocurrencia de ciertos fenómenos periódicos en los ciclos vitales de las plantas cultivadas, como germinación, floración, maduración, etc.

Bioclimatología Agrícola. Estudia los procesos fenológicos y el rendimiento de los cultivos como una función de la marcha anual de los elementos del clima en un lugar determinado. También estudia la localización geográfica de los cultivos, como una consecuencia de las relaciones bio-metereológicas investigadas, asimismo considera también influencias de diferentes condiciones climáticas sobre la fauna. Algunos autores la consideran rama de la agrometeorología.

Geografía Agrícola. Trata de la distribución de los cultivos sobre grandes áreas geográficas y largos períodos de tiempo, debido a efectos climáticos, edáficos, topográficos y de latitud..

1.7 Ubicación de la Agrometeorología como ciencia

La Agrometeorología es una combinación de ciencias físicas y biológicas, de hecho se constituye en un ejemplo valioso de la unión entre ambas (Romo y Arteaga, 1983).

Norero (1977), ubica a la agroclimatología y a otras ciencias afines, en relación con la agrofísica (Figura 1.1), ya que el considera que la agrofísica es la ciencia que trata de los procesos y propiedades físicas que se expresan en el medio ambiente de los cultivos y animales domésticos, y el medio atmosférico es sólo una parte del medio ambiente.

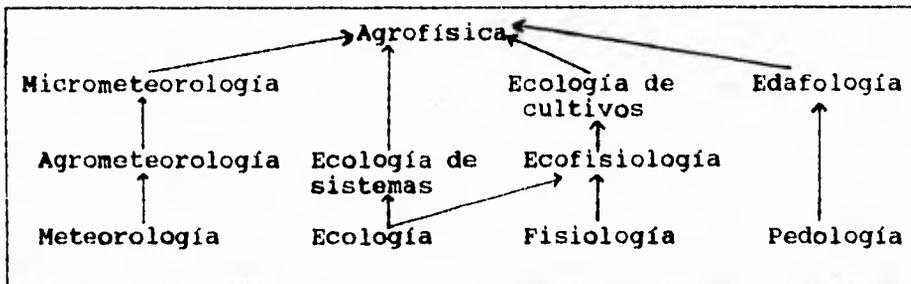


Figura 1.1 . Ubicación de la Agrometeorología en relación con la Agrofísica. Norero 1977.(Romo y Arteaga, 1983).

Da Nota, (1979) considera que más que una ciencia "vertical", la agrometeorología es una ciencia de carácter "horizontal" y que recurre sin distinguos tanto a las ciencias físicas y biológicas, como a las ciencias matemáticas y químicas. La Figura 1.2., indica esquemáticamente las relaciones de la agrometeorología con otras ciencias.

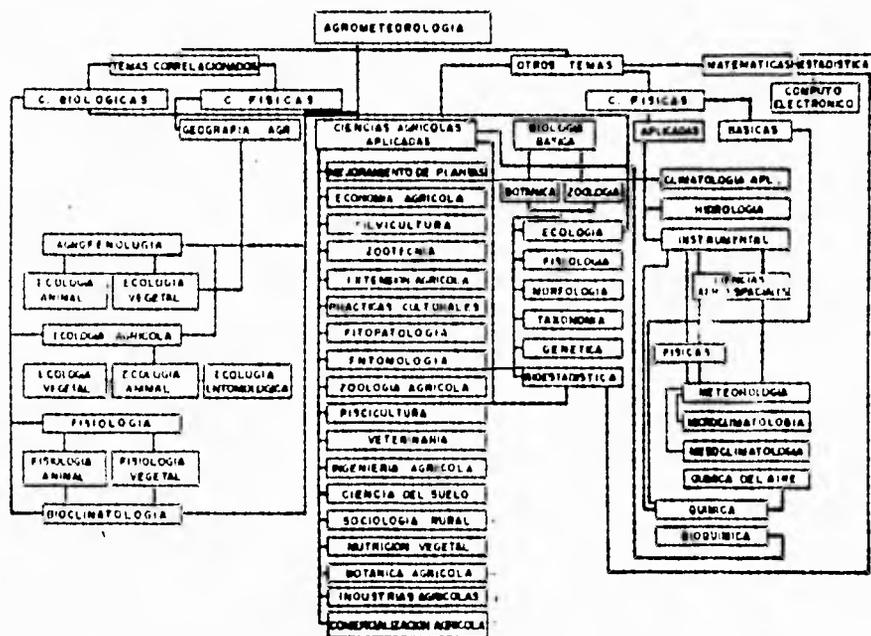


Figura 1.2 Relaciones de la Agrometeorología con otras ciencias. Da Mota, 1979. (Romo y Arteaga, 1983)

Villalpando (1984), define a la Agroclimatología como una ciencia, la cual conecta a la climatología y a la agricultura, e involucra la utilización de información y técnicas de varias materias y la integración de esta información hacia la solución de un problema particular. (Figura 1.3).

Como se observa en la Figura 1.3, la agroclimatología resulta de la intersección de varias disciplinas básicas, las cuales dan origen a esta ciencia. De este esquema Villalpando, deduce dos aspectos:

- 1) Los componentes (disciplinas Básicas) que dan origen a la agroclimatología, algunos de ellos son herramientas de trabajo (estadística, instrumentación), mientras que otros (ciencia de los cultivos, ciencia animal, etc...), en realidad son las áreas de aplicación de esta ciencia.
- 2) El especialista en agroclimatología, se considera que debe tener una formación académica que involucre el conocimiento de las disciplinas básicas (Figura 1.3), que integran la agroclimatología.

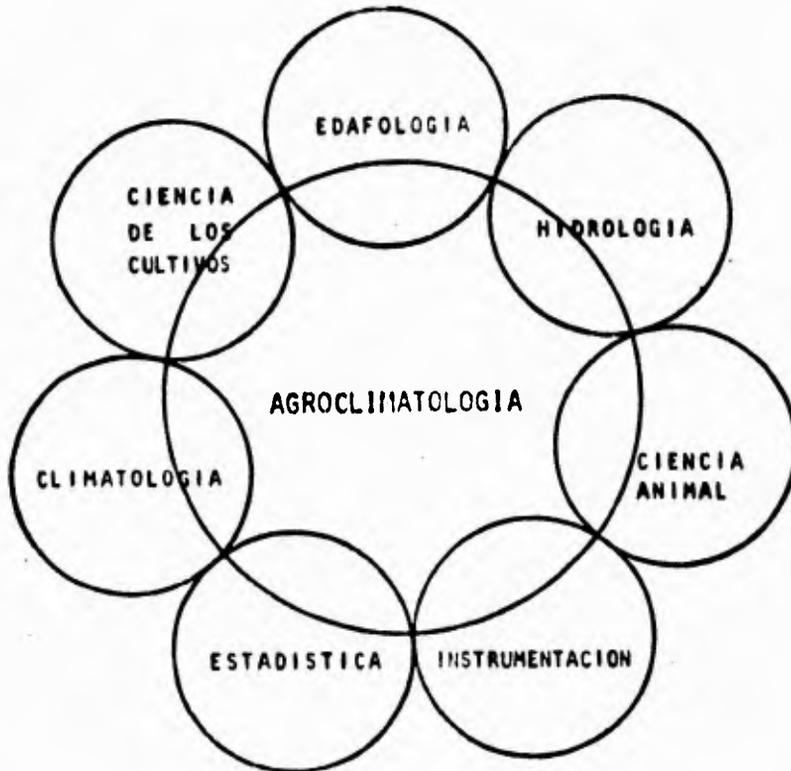


Figura 1.3. Definición esquemática de la Agroclimatología.
(Villalpando 1984).

1.8 Alcance de la Agrometeorología

La meteorología agrícola trata de la acción mutua que se ejerce entre los factores meteorológicos e hidrológicos y la agricultura en su más amplio sentido, incluida la horticultura, la ganadería y la silvicultura.

Su objetivo es detectar y definir dichos efectos para después aplicar los conocimientos que se tienen de la atmósfera a los aspectos prácticos de la agricultura.

Su campo de interés se extiende desde la capa del suelo, donde se hallan las más profundas raíces de las plantas y árboles, pasando por la capa de aire próxima al suelo en la que los cultivos, árboles y animales viven, hasta alcanzar elevados niveles de la atmósfera que interesan a la aerobiología, siendo esta última capa de gran

interés para el transporte de semillas, esporas, polen e insectos.

Además del clima natural y sus variaciones locales, la agrometeorología trata de las modificaciones del medio ambiente (como las producidas por los paravientos, barreras de protección, riego y medidas contra las heladas), de las condiciones climáticas durante el almacenamiento, tanto en el interior como sobre el terreno, de las condiciones ambientales en los alojamientos del ganado y en los edificios agrícolas y por último en el interior de los vehículos durante el transporte de los productos agrícolas.

1.9 Objetivos de la Agrometeorología y de la Agroclimatología

Objetivo Principal.

Mejorar la producción agrícola mediante la previsión precisa, conocimiento y control de las condiciones atmosféricas. Es decir, apoyar a la agricultura en sus diversas formas y facetas (fruticultura, ganadería, silvicultura, etc.).

Objetivos Secundarios.

Además del clima natural, de sus variaciones locales y su relación con la agricultura, se estudian los siguientes aspectos:

- a) Modificar artificialmente el medio ambiente (barreras rompivientos, invernaderos, riegos, etc).
- b) Relacionar cualitativamente entre el medio atmosférico y los seres vivos: cultivos, ganado, aves domésticas, insectos y microorganismos de importancia económica.
- c) Relacionar cuantitativamente entre el medio atmosférico y las respuestas biológicas de las especies vegetales cultivadas y los animales domésticos.
- d) Condicionar ambientalmente el transporte y almacenamiento de productos agrícolas.

1.10 Aplicaciones de la Agrometeorología y de la Agroclimatología

Cualquiera de las aplicaciones de la meteorología y climatología agrícola tienden a favorecer el incremento de la producción agrícola mediante un mejor conocimiento de los recursos del tiempo y del clima en tres aspectos básicos:

I) Apertura de nuevas zonas a la producción agrícola. Evaluando los recursos agroclimáticos regionales.

Una evaluación de los recursos agroclimáticos regionales, involucra el análisis estadístico de la información histórica de los diferentes elementos climáticos (temperatura, precipitación, humedad, etc.). A través de este análisis se obtienen una serie de índices agroclimáticos con los cuales es posible evaluar a nivel regional lo siguiente:

1. Evaluación del ecosistema.
2. Evaluación de recursos agroclimáticos disponibles.
3. Selección de cultivos y animales, variedades y razas de acuerdo a la disponibilidad de tales recursos.
4. Planificación a largo plazo de los sistemas agrícolas.
5. Estudios de condiciones climáticas análogas.
6. Estudios de variabilidad climática.

II). Aumento de la eficiencia de la producción agrícola, mediante el análisis del clima y su relación con programas operativos.

El análisis del clima de un lugar o de una región, es útil no solamente en actividades operativas de programas en marcha sino también en la etapa de planificación de éstos.

De un análisis del clima se puede determinar, con una base probabilística, y para fines de planificación las siguientes actividades:

1. La utilización de maquinaria para la siembra de cultivos, recolección y secado de granos, forrajes, legumbres, etc.
2. Medidas de control de plagas y enfermedades.

3. Construcciones de edificios agrícolas, especialmente los alojamientos de los animales y los almacenes de los productos agrícolas.

III). Minimizar las pérdidas en la producción agrícola, por modificación artificial del microclima de plantas y animales.

La modificación artificial del microclima tanto de plantas como de animales tiende a lograr dos objetivos:

1. Reducir el impacto de factores edáficos y climáticos adversos sobre la producción de cultivos. Por ejemplo, el microclima caliente y seco dentro de un cultivo, causado por temperaturas excesivamente altas y déficit de agua en el suelo, es posible modificarlo mediante riego por aspersión, eliminando el déficit de agua en el suelo y la temperatura disminuye.

2. Prevenir el posible daño causado por fenómenos meteorológicos adversos (heladas, granizo, vientos fuertes, etc.). Aquí la protección del daño puede ser en dos formas:

a) Seleccionar los cultivos, variedades y lugares para evitar los valores extremos de los fenómenos meteorológicos que puedan dañar las plantas.

b) Mejoramiento de los lugares para evitar o reducir el impacto de estos valores extremos.

Aplicaciones Generales de la Agrometeorología y la Agroclimatología.

I. En la planificación, caracterizando la aptitud agroclimática, seleccionando los cultivos, variedades y lugares para evitar los valores extremos de los fenómenos meteorológicos que puedan dañar las plantas.

II. Zonificación de cultivos.

III. Introducción de nuevas especies y variedades.

IV. Determinación de las adversidades climáticas para cada cultivo con base en su fenología, con el objeto de tomar medidas que tiendan a eliminar o atenuarlas.

V. Planeación de los calendarios de siembra y cosecha.

VI. Planeación, diseño y operación de sistemas de riego.

VII. Modificaciones microclimáticas (cortinas, rompevientos, invernaderos, etc.)

VIII. Predicción de rendimientos.

IX. Transporte y almacenamiento de productos agrícolas.

X. Planeación del aprovechamiento y conservación del suelo.

XI. Determinación de las necesidades y características bioclimáticas y ecofisiológicas de los cultivos.

XII. Planeación de la explotación de agostaderos, bosques y selvas, así como programas de reforestación.

Ventajas del Conocimiento del Oportuno de la Agrometeorología y la Agroclimatología.

I. Previsión y combate de heladas.

II. Predicción de la aparición de plantas y enfermedades dado el estado del tiempo.

III. Calendario en base a las condiciones atmosféricas y biológicas, los momentos oportunos de preparación de tierras, siembra, laboreo, cosecha, y aplicación de agroquímicos..

IV. Prevenir a los agricultores del peligro de granizadas, vientos huracanados, lluvias excesivas, etc.

V. Avisos de incendios en los bosques.

VI. Control de insectos y enfermedades.

VII. Momento oportuno del riego.

1.11 Principios que rigen la distribución de los organismos

El crecimiento y producción de los organismos depende de la interacción de una población de plantas o animales y el medio físico en el cual viven.

Una división del medio físico, conveniente para entender las relaciones complejas de los seres vivos con su medio abiótico, en cuanto a los elementos del clima se refiere, es la siguiente:

Temperatura: es el principal elemento para determinar el área tropical, subtropical, templada, etc., y los límites dentro de los cuales pueden habitar los organismos.

Precipitación: determina las diferentes zonas híbridas y los límites dentro de los que se desarrollan los organismos, especialmente las plantas, en cuanto a sus necesidades de agua.

Vapor de agua, bióxido de carbono (CO₂) y Oxígeno (O₂) los dos últimos y el déficit de saturación de agua pueden afectar al crecimiento.

Viento: puede afectar al crecimiento de las plantas, al cambiar la concentración de CO₂ a la altura de ellas; asimismo, puede causar daños mecánicos a las plantaciones y ser el responsable total o parcial de la propagación de esporas, plagas, enfermedades, contaminantes, etc.

Luz: determina la intensidad fotosintética y el fotoperíodo.

Cada factor del medio, puede bajo condiciones particulares, transformarse en determinante del crecimiento de un organismo o una población. Así los seres vivos, en un proceso evolutivo, se han adaptado al medio hasta el punto de que este ha llegado a ser determinante en su reproducción y desarrollo.

El hombre, desde que inventó la agricultura hará unos 10,000 años, llegó a conocer la influencia del comportamiento del tiempo en la producción.

Esta relación tan directa entre cultivo y tiempo estuvo siempre presente en la mente del agricultor, aún antes del acelerado desarrollo científico de la agricultura con el uso

de productos químicos, maquinaria, mejoramiento genético, nuevas prácticas de siembra, industrialización, etc.

1.12 Perspectiva geográfica de la Agroclimatología

Palacio y Gómez (1989), realizan un estudio para encontrar la perspectiva geográfica de la agroclimatología, en su búsqueda establecieron las coincidencias y las afinidades conceptuales y metodológicas entre la geografía y la agroclimatología.

Sus aseveraciones se basaron en un análisis histórico de la geografía, que a través del tiempo ha pasado de la disciplina descriptiva (siglo XVIII), a la ciencia institucionalizada que empieza a generar sus propias bases teóricas y metodológicas en el siglo XIX. Desde entonces hasta la actualidad, la conceptualización de la geografía ha fluctuado dentro de diversas corrientes filosóficas positivistas e historicistas, y por lo tanto sus métodos han variado según los enfoques de estas corrientes.

Las tradiciones a las que se refieren Palacio y Gómez, son las siguientes:

1. La física a nivel descriptivo de superficie terrestre.
2. La corológica.
3. La ecológica en su relación hombre-medio (ecosistemas).
4. La paisajística de entornos humanos y naturales diferenciables.
5. La espacial que aspira a la localización y organización espaciales.
6. La tradición Social.

"Todas estas corrientes actualmente han permitido conformar de alguna manera el objeto y método de estudio de la geografía".(Gómez, 1989).

Lo anterior, llevó a estos dos autores a deducir lo siguiente:

"El núcleo central de estudio de la Geografía es, por tanto, la relación sociedad-naturaleza en su manifestación espacial y que basa sus lineamientos metodológicos en: la observación analítica, el establecimiento de interrelaciones hombre-medio, la diferenciación espacial a partir de estas, y la organización del espacio cuando se aspira a planear las actividades humanas".

" Una vez aclarado someramente el punto de vista metodológico geográfico, podemos ubicar dentro de su campo

de estudio a la agroclimatología. Esto nos conduce a analizarla bajo una perspectiva geográfica, de tal suerte que la agricultura y el clima tienen una manifestación espacial. Esta manifestación la podemos analizar a dos niveles. Un primer nivel básico o elemental, para insertarla en una realidad socioeconómica, y un segundo nivel que establezca las principales confluencias sobre la agroclimatología".

"Primer nivel.- La agricultura como actividad humana, y por consiguiente económica, forma parte de aquellas actividades que desarrolla el hombre cuando trabaja directamente la naturaleza (actividades primarias), y genera sus propias relaciones de producción y circulación según su grado de desarrollo. Requiere de centros de producción, infraestructura para operaciones de traslado, y centros organizados de redistribución al mercado. Todas estas condiciones que integran una parte de la estructura económica de un país, están regidas por una circulación o movimiento intra e interregional, en donde existe uno o varios centros rectores que organizan y/o determinan todas las fases que comprende la actividad agrícola. De estos centros parten vectores de circulación (operaciones de comercialización) hacia los centros de distribución y consumo, vectores que se hacen visibles en el espacio a través de un amplio conjunto de infraestructura (autopistas, autopistas y carreteras, puertos, túneles, puentes, aeropuertos, etc...) que a su vez tienen una fuerte influencia en las formas de poblamiento en los fenómenos de división espacial del trabajo y en el medio ambiente".

"Por otra parte, el clima, concebido como el estado más frecuente de la atmósfera en un lugar determinado y único, también permita caracterizar al espacio, y por el contrario del tiempo atmosférico que varía de un día a otro, el clima varía de un lugar a otro, teniendo una connotación eminentemente geográfica. A su vez, el clima, como expresión directa del arreglo entre los factores y elementos que lo constituyen, determina de manera parcial pero sustancial la distribución de la agricultura en sus distintas categorías (de subsistencia, comercial y especulativa), sobre todo a nivel de centros de producción y manejo del producto".

"Particularizando sobre los componentes del clima insertos en el primer nivel, podemos dividirlo como ya se ha mencionado, en dos grupos básicos: factores y elementos climáticos. Los factores climáticos son las causas que hacen variar los elementos del clima de un lugar a otro, y de una estación a otra. Actúan con diferente intensidad y en combinaciones distintas sobre los elementos y los hacen variar en diferentes grados y categorías, originando los distintos tipos de clima. Los elementos son por tanto

propiedades físicas de la atmósfera, variables en función directa del arreglo de los factores climáticos".

"El clima se puede diferenciar espacialmente en: macroclima, mesoclima y microclima, dependiendo de la variabilidad de sus componentes". (Figura 1.4).

"De lo mencionado anteriormente y su relación directa con la agricultura como actividad humana y económica se desprenden algunos principios de orden, que nos permiten apreciar de la organización del espacio".

Estos son, según Pierre George (1976):

1. La base material de producción se expresa en la actividad agrícola en términos de superficie. La economía agrícola proviene de una habilitación del espacio al que se aplican técnicas y tiempo de trabajo.

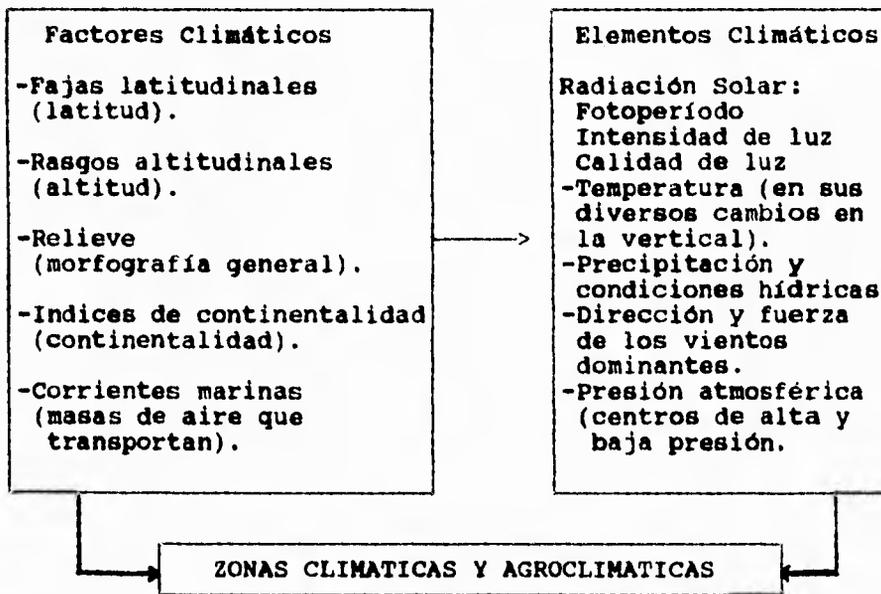


Figura. 1.4. Variabilidad de los componentes del clima y su relación con la agroclimatología.
 Palacio y Gomez, 1989.

2. La aplicación de tiempo de trabajo para la obtención de un producto agrícola debe sujetarse a ciclos climáticos y en

consecuencia biológicos. En términos técnicos y económicos, el "tiempo operacional" viene impuesto por las condiciones naturales y ligado a las fases y subperíodos vegetativos de las plantas.

3. Las condiciones naturales ponen límites geográficos a las distintas categorías de producción agrícolas. Los cultivos se reducen a ámbitos definidos por regímenes térmicos o pluviométricos, higrométricos y de radiación solar, aunque la creación de nuevas variedades híbridas, la modificación de ciertos elementos del medio natural (actividades agronómicas) y la elección de métodos de cultivo acelerado o de gran rendimiento, permiten reducir en proporciones considerables el sometimiento servil de la agricultura al medio natural. Sin embargo, siempre es mejor buscar alternativas de trabajo común con la naturaleza.

Es entonces, que en este primer nivel, la geografía integra sistemáticamente la agricultura y el clima de la siguiente manera (Figura 1.5):

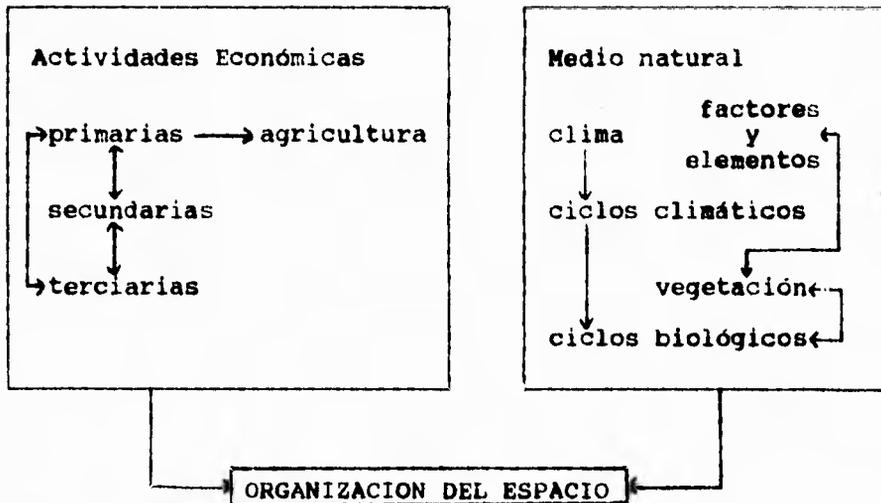


Figura 1.5. Perspectiva Geografica de la Organización del Espacio. Palacio y Gomez, 1989.

"Segundo nivel. El segundo nivel como consecuencia directa del primero, establece de manera más amplia las principales confluencias sobre la agroclimatología, situando como punto de concurrencia básico, el espacio geográfico. De esta manera, la concepción espacial a este nivel resulta de

la compleja interrelación que se muestra en el siguiente cuadro". (Figura 1.6).

"De entre los recuadros es importante destacar la evolución histórica-social como generadora de estructuras agroclimáticas temporales que se van sucediendo. Estructuras que persisten mientras los elementos que constituyen su arreglo no cambien, y que se transforman si el ritmo de las necesidades creadas por una sociedad se modifican; de tal manera que la percepción del espacio geográfico es también temporal".

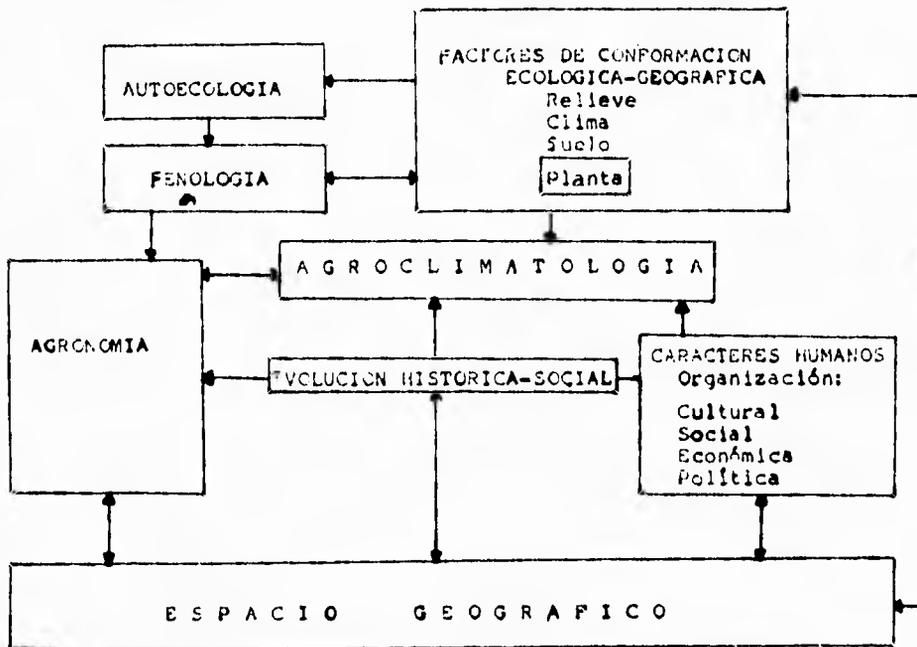


Figura 1.6. Interrelaciones del Espacio Geográfico de la Agroclimatología. Palacio y Gómez, 1989.

CAPITULO 2

CARACTERISTICAS DE LAS CLASIFICACIONES CLIMATICAS

2.1 Introducción

La acción conjunta de varios elementos climáticos (temperatura, precipitación, viento, etc.) y su relación con varios factores macroclimáticos y microclimáticos (latitud, relieve, altitud, continentalidad, cobertura vegetal, etc.) generan diferentes tipos climáticos. Dado que una misma combinación de elementos se repiten en diferentes partes del planeta, se puede utilizar esto como criterio para una clasificación. De acuerdo con el objetivo práctico o científico, se han desarrollado diferentes sistemas de clasificación climática. La mayoría de los sistemas tienen por objeto generar zonificaciones de la vegetación. Cada sistema da preponderancia a la combinación de determinados elementos climáticos.

Según ha indicado **Kendrew** (1949), la "descripción del clima no es, en modo alguno, real si no están representados en ella todos los matices que se producen a causa de la variación de los factores meteorológicos y los cambios estacionales que son los más destacados".

La variación meteorológica que se produce de día a día, lugar a lugar y estación a estación es promovida por un número de causas determinadas del clima (**Trewartha**, 1954); entre ellas figuran la altitud, distribución de tierra y agua, masas semipermanentes de baja y alta presión, vientos, altitud, barreras montañosas, corrientes oceánicas. Las variaciones en cantidad, intensidad y distribución estacional de temperatura, precipitación y humedad, presión atmosférica y vientos, producidas por las causas determinantes del clima, proporcionan el fundamento para la existencia de una variedad climática.

Por clasificación mediante el reconocimiento de semejanzas entre tipos individuales y el agrupamiento de éstos en clases se puede lograr un cierto grado de significación y orden, en un gran número de climas individuales, ligeramente diferentes. Una clasificación simple y fidedigna de los climas es extraordinariamente útil al ecólogo, al proporcionarle una base que le permita relacionar las necesidades y tolerancias ambientales específicas de las plantas con su distribución actual y sus posibilidades en el mundo entero.

2.2 Elementos y factores que influyen en las clasificaciones climáticas

Aunque se ha reconocido la necesidad de una clasificación mundial simple de los climas, ello entraña, según Trewartha, muchas dificultades. Un cuadro climático regional podría ser ofrecido por el análisis:

- 1) de los elementos climáticos individuales, mediante la observación de los datos obtenidos con los instrumentos de medida; y
- 2) de los estados de tiempo prevalecientes, mediante el estudio de cartas meteorológicas diarias.

El clima actúa sobre la vegetación, favoreciendo determinado tipos biológicos, cuya preponderancia caracteriza una formación vegetal, y sobre las especies, determinando su distribución geográfica.

Las plantas cultivadas muestran, en su distribución actual, la influencia ejercida por las condiciones ambientales, en especial por elementos climáticos. Asimismo, el clima tiene gran influencia sobre la distribución y comportamiento de las especies animales. Su efecto puede ser directo sobre el animal o indirecto por medio de la disponibilidad de alimento. Lógicamente, el hombre no escapa a esta influencia. Las diferentes culturas están ligadas íntimamente a los tipos climáticos.

Si bien el clima es una manifestación de todos los elementos meteorológicos en interacción, se ha asignado un valor más significativo a algunos de ellos. Los investigadores se refieren a la temperatura, la precipitación, la radiación solar, la humedad atmosférica y los vientos como los elementos de mayor importancia en sus clasificaciones climáticas.

El comportamiento de los elementos climáticos es influenciado por determinado factores, que se pueden situar de la siguiente forma:

- a) De ubicación geográfica: latitud y longitud, que guardan estrecha relación con el ángulo de incidencia y magnitud de la radiación solar; altitud, que genera variaciones en la temperatura y en la presión atmosférica.
- b) Topográficos: que tienen que ver con la configuración superficial del terreno y con la orientación de las pendientes, y que tienen considerables efectos sobre las lluvias y los movimientos del aire.

c) De distribución de las masas de agua con respecto a las continentales: la proporción entre ambas influye sobre la dinámica de la temperatura y humedad.

d) Geológicos y Botánicos: que se refieren al tipo de suelo y al tipo de cubierta vegetal, que modifican el comportamiento de los elementos climáticos como, por ejemplo, el balance de radiación.

"La planificación del uso adecuado de la tierra implica la correcta elección, tanto de la actividad agropecuaria como de las técnicas de manejo correspondientes, basándose en el conocimiento de los hechos físicos, biológicos y sociales del ambiente".(Jochen, et al. 1986).

En este sentido, la agroclimatología estudia las características ecológicas de las regiones y las necesidades climáticas de los organismos vivos para optimizar el uso de los recursos naturales.

2.3 Clasificación de los climas

Todo sistema de clasificación tiene por objeto disponer la información en forma simple y generalizada. Por consiguiente, las estadísticas climatológicas pueden ser organizadas de manera que describan y delimiten los principales tipos de clima en términos cuantitativos.

Barry y Chorley (1978), resumen los principios básicos de tres grupos de sistemas de clasificación, y son los siguientes:

1. Clasificaciones Genéricas basadas en la Vegetación.

Estos sistemas se proponen para relacionar los límites climáticos con el crecimiento de las plantas o con los grupos de vegetación y se basan en dos criterios principales: el grado de aridez y la temperatura. Dentro de estos sistemas agrupan a R. Lang (1915), Köppen (1900-1936), A.A. Miller (1951), y C.W. Thornthwaite (1931).

2. Clasificaciones Racionales basadas en el Balance de Vapor de Agua.

Estas clasificaciones se basan en el concepto de evapotranspiración potencial y en el balance de vapor de agua. La contribución más importante es la que realiza Thornthwaite en su segunda clasificación climática (1948).

Debido a la complejidad que adquieren estos sistemas se han confeccionado diversas tablas para facilitar el cálculo de estos factores. Posteriormente en 1955 se incorpora una característica al sistema, y es que la eficacia térmica deriva del valor de la evapotranspiración potencial, ya que éste es en sí mismo función de la temperatura.

En la Unión Soviética M.I. Budyko (s.f.), ha utilizado un enfoque similar, en el que emplea los valores de la radiación neta en vez de los tradicionales valores de la temperatura. Publica un mapa general con la estimación de la relación R_n/L_r (radiación neta/precipitación anual media), pero existen grandes zonas de la tierra en las que aún no se dispone de medidas de radiación neta.

3. Clasificaciones Genéricas.

La base científica de los climas a gran escala o macroclimas la constituye la circulación atmosférica, hecho que puede relacionarse con la climatología regional en términos de los regímenes de vientos o de las masas de aire. En un intento de clasificación, realizado por A. Hettner (1931), se utilizaban los sistemas de vientos, la continentalidad, la cantidad y duración de la precipitación, la situación con relación al mar y la altura. B.P. Alissov publicó en 1936, un sistema muy generalizado, en el que se utilizaba las masas de aire según su predominio en las diversas estaciones.

Posteriormente H. Flohn (1950), propuso un sistema más satisfactorio, considerando las principales categorías en los cinturones globales de viento y las características de la precipitación.

Jochen, et al. (1986), considera que las condiciones bioclimáticas de un determinado lugar deben ser caracterizadas, de tal manera que permitan evaluar la adaptación de un sistema dado, basándose en sus necesidades específicas. La caracterización debe ser hecha en términos que permitan establecer una relación entre las necesidades del sistema y las disponibilidades bioclimáticas, lo que ha dado como resultado un gran número de clasificaciones climáticas e índices bioclimáticos.

Un término que refleja una condición climática con significado biológico, constituye un índice bioclimático. Los índices bioclimáticos constituyen indicadores de las condiciones ambientales, cuyo valor tiene un significado para los organismos vivos.

Espinosa Cardenas (1994) considera que un índice bioclimático es un indicativo de las sensaciones que producen en el ser humano los elementos atmosféricos en su conjunto.

Cuando estos índices forman un conjunto de valores climáticos con significado agrícola y ordenados según prioridades se denominan índices bioclimáticos cuantitativos o agroclimáticos, como las que ha continuación se ejemplificarán:

1) Índices térmicos.

La temperatura es una variable climática que puede favorecer o limitar la distribución, el desarrollo y el rendimiento de los organismos. Cada especie tiene un rango térmico, por exceso y por déficit, más o menos preciso, dentro del cual se hallará su óptimo.

La temperatura es, posiblemente, uno de los índices bioclimáticos de uso más antiguo, tanto porque varía muy poco de un ciclo anual a otro, como por la facilidad y precisión con que se puede tomar este dato. En sus diferentes formas de caracterización, como valores promedio extremos o de amplitud térmica, la temperatura ha sido utilizada como un indicador de óptimos y rangos para el desarrollo de los organismos vivos.

La temperatura está relacionada con el crecimiento y con el desarrollo de las plantas, asimismo, con la velocidad a la que estos procesos se llevan a cabo. Cada fase del período vegetativo (subperíodo) de una especie presenta un valor térmico óptimo diferente. Por ejemplo, el algodón tiene una temperatura óptima de 19°C para su germinación y de 24°C para su desarrollo .

En su mayoría, las variaciones de frijol muestran su desarrollo óptimo entre 18°C y 24°C, de ahí que las temperaturas altas perjudiquen su fructificación y las temperaturas bajas limiten el crecimiento. Para la caña de azúcar, la temperatura óptima para la germinación se sitúa entre 28°C y 32°C y el óptimo para el ahijamiento se encuentra entre los 22°C y 39°C. El café es poco tolerante a las variaciones de las temperaturas promedio de 18°C a 21°C.

La temperatura a la cual se detienen el crecimiento de una planta se conoce como un cero vital. Este punto varía con la especie y con los cultivos. En promedio, es de 5°C para el trigo, de 12°C para el maíz y de 15°C para la soya. El cero vital para el algodón se encuentra entre los 12°C y 14°C. El frijol no presenta crecimiento por debajo de los 10°C. Todavía no ha sido determinado exactamente el cero

vital de la caña de azúcar, pero hay varias referencias que indican los 16°C . Temperaturas promedio por debajo de los 12°C inhiben el desarrollo del cafeto.

Una forma de medir el requerimiento térmico de un subperíodo o del ciclo total del cultivo, se efectúa sumando las temperaturas medias a partir del cero vital de la especie, método denominado sumas térmicas, grados-día o unidades calor.

Dado que en las zonas bajas de los trópicos, las temperaturas mínimas superan el cero vital de la mayoría de las especies, existe la tendencia a reemplazar el concepto de sumas térmicas por el de grados efectivos, que corresponde a la suma de las temperaturas medias diarias durante el ciclo del cultivo, sin restar la temperatura correspondiente al cero vital.

Las bajas temperaturas pueden tener efectos favorables o desfavorables para las plantas. Los fitoclimatólogos se han visto en la necesidad de precisar estas exigencias y tolerancias de modo objetivo. Existen especies que tienen necesidad de "descanso", que constituye un período de cambios fisiológicos no visibles que ocurren antes de la reactivación primaveral; este período demanda temperaturas suficientemente bajas. Como indicador de tales necesidades, se ha utilizado el registro del mínimo de horas con temperaturas por debajo del nivel térmico, a partir del cual se manifiesta el crecimiento. La acumulación de estas horas, método denominado "horas de frío" se ha utilizado para estimar las necesidades de frío de las plantas criofitas, y constituye un índice de aptitud agroclimático muy difundido, especialmente en la fruticultura. También se ha utilizado la temperatura media del mes más frío del año o la temperatura media anual como índice de la disponibilidad de frío, pero son estimadores menos precisos que las horas de frío.

Durante el período de descanso, las plantas criofitas son resistentes a las bajas temperaturas, incluso inferiores a 0°C , sin embargo, fuera de este período, se tornan prácticamente tan sensibles como la mayoría de las especies termófitas.

El descenso térmico igual o inferior a 0°C , conocido como "heladas", constituye un fenómeno de alto significado biológico y se ha utilizado para delimitar regiones biogeográficas y zonas agroclimáticas.

En la consideración de la helada, tiene importancia para las especies la intensidad y, especialmente, la fase de desarrollo del cultivo en la cual ocurre. Algunos autores, como Burgos (1963), han propuesto índices para medir la peligrosidad de las heladas, los cuales consideran los aspectos señalados. De esta manera, el índice de

peligrosidad de las heladas invernales se obtienen al vincular la intensidad de la misma con la resistencia específica de las plantas.

2) Indices hídricos.

La temperatura y el agua constituyen los principales elementos que afectan a la actividad biológica.

En una zona templada, la evapotranspiración es menor que en una zona caliente, de ahí que, en la primera, el agua suministrada por la lluvia permanezca más tiempo a disposición de las plantas. De este modo, por ejemplo, 20 mm de precipitación caídos, con temperaturas medias cercanas a 15°C, se evaporizan más lentamente que con temperaturas promedio cercanas a los 26°C.

Para dar una idea de la disponibilidad efectiva del agua, se han propuesto diversos índices, los cuales han recibido la denominación genérica de índices hídricos. Estos pueden obtenerse por medio de un cociente entre la precipitación media anual y la temperatura de cierto período. También pueden utilizarse la precipitación y el déficit de saturación de humedad de la atmósfera en un período determinado.

3) Indices fotoperiódicos.

El conocimiento de la necesidad fotoperiódica de las plantas ha permitido un mayor éxito al trasladarlas y cultivarlas en regiones de latitudes diferentes a la de su origen. Por otra parte, la disponibilidad fotoperiódica de un lugar permite la selección de variedades y fechas de siembra más adecuadas, sin dejar de lado los otros factores. La disponibilidad de horas luz, como tal constituye un índice agroclimático

4) Cultivos índices.

Desde hace mucho tiempo se ha utilizado el valor que tiene el comportamiento de las plantas y los animales en la predicción de las características físicas del ambiente.

Algunos autores han propuesto la utilización de observaciones sobre la presencia y el rendimiento de plantas nativas o cultivadas, como indicadores de las condiciones climáticas, Papadakis (1960) estableció su clasificación climática sobre esta base, sus tipos climáticos están caracterizados por las ventajas que ellos presentan frente a las exigencias de determinados cultivos, algunos ejemplos de estos tipos son: clima café, clima caucho, clima cacao.

De Fina, et al (1966), propusieron un método para evaluar las condiciones climáticas y agroclimáticas de una región de acuerdo con el desarrollo que alcanzan 18 cultivos índices en un determinado lugar, evaluando la abundancia del cultivo, el rendimiento de los frutos y su grado de maduración. Los cultivos fueron seleccionados por su amplia difusión y por seguir un cambio gradual en sus necesidades térmicas, de humedad y de precipitación, revelando aspectos climáticos locales con cierta aproximación.

Para ello preparó una lista de 12 plantas perennes, fanerófitas, que el hombre tiende a cultivar siempre en todo lugar donde se instala. Las 12 plantas son las siguientes: cacao, ananás, banano, limonero, datilera, olivo, higuera, vid europea, nogal, duraznero, peral y manzano. Las 12 plantas están ordenadas en forma creciente por su resistencia a los fríos invernales, es decir el cacao es la planta más sensible a los fríos y el manzano la planta más resistente a las heladas invernales.

A su vez, ésta colección de 12 plantas está constituida por tres subcolecciones de cuatro plantas cada una, a saber:

a) cacao, ananás, banano y limonero, son plantas que pueden prosperar en climas húmedos y lluviosos;

b) datilera, olivo, higuera y vid europea, son cultivos que prosperan admirablemente en climas secos y asoleados (si disponen de suficiente humedad en el suelo); y

c) nogal, duraznero, peral y manzano, consideradas intermedias en cuanto a sus exigencias hídricas.

En cuanto a las plantas de siembra anual son seis, y están ordenadas en forma decreciente por la intensidad y duración del verano que requieren para madurar sus frutos o granos, a saber: algodón (la que requiere mayor duración del verano), sandía, maíz, trigo, avena y cebada (la menos exigente en calor).

También la vegetación natural puede ser indicadora de condiciones climáticas particulares. Ejemplo de ello lo constituyen los manglares, que crecen generalmente cerca de las costas.

2.4 Temperatura y precipitación como elementos climáticos de clasificación

Estas clasificaciones hacen uso generalmente de promedios anuales de temperatura, precipitación y evaporación, para establecer límites entre un tipo de clima y otro. Estas clasificaciones se han empleado para clasificar y cartografiar los diferentes tipos de climas que existen sobre la superficie de la tierra.

1) Clasificación de Köppen.

El esquema de clasificación del clima creado por Vladimir Köppen de Austria, fue publicado por primera vez en 1901, posteriormente este sistema de clasificación fue modificado varias veces, hasta la última versión publicada en 1936. El sistema de clasificación climática de Köppen ha sido ampliamente utilizado para clasificar el clima, tanto a nivel global como a nivel de un país, o de un continente en particular (Trewartha, 1968).

La temperatura y la precipitación fueron utilizados por Köppen como los elementos principales en su clasificación. Este investigador dividió el clima del mundo en cinco grupos, que corresponden al mismo número de grupos principales de vegetación. La vegetación nativa es considerada la mejor expresión del efecto general del clima. La efectividad de la precipitación depende en parte de la temperatura. Así una determinada cantidad de lluvia es menos efectiva en un clima cálido que en uno frío.

Cada clima de esta clasificación es descrito por una fórmula compuesta de letras, a las que corresponden, a su vez, una significación específica. Por ejemplo, Af es interpretada como A= constante caluroso, la temperatura media del mes más frío es superior a 18°C; f= constante húmedo, en ningún mes de la precipitación es inferior a 6,1 cm. Trewartha modifica este sistema, este autor reconoce cinco grandes grupos de climas, y establece tipos de clima semejantes a Köppen, en las subdivisiones del grupo C se establecen algunas diferencias.

En México, García (1964), hizo modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones particulares de la República Mexicana. Realiza la obra "Modificaciones a la clasificación climática de Köppen", en la que dio lugar al destacado estudio de las zonas áridas de México, en cuanto a las diferentes áreas que pueden fijarse conforme a tal clasificación.

2) Clasificación de De Martonne.

De Martonne (1926) empleó la precipitación y la temperatura para derivar un índice de aridez (I), el cual propuso para estratificar el tipo de vegetación.

$$I = P / T + 10$$

donde:

P = precipitación media anual
T = temperatura en °C.

Indice (I)	Tipo de vegetación
< 5	Desierto (árida)
10-20	Estepa (semiárida)
20-30	Praderas
> 30	Bosque

Los límites entre un tipo de clima y otro que se observan en un mapa de climas son trazados usando los valores promedio, estos límites son variables, dependiendo de las condiciones de precipitación y temperatura que se presenta cada año. Así que, una región con clima semiárido en un año muy lluvioso se semeja a una región subhúmeda, y en un año muy seco, esta región se parece a una región árida. Este tipo de análisis es importante cuando se quieren establecer los límites de las regiones áridas o semiáridas.

3) Índice de aridez.

En 1932 Luis Emberger propuso su índice de aridez:

$$Q = 100 P / (M+m) (M-m)$$

donde:

P= precipitación media anual
M= temperatura media máxima del mes más caliente.
m= temperatura media mínima del mes más frío.

Este índice de aridez corresponde a la fórmula de De Martonne, en cuanto a que en el numerador figura también la expresión de T+10 de éste por el producto M+m entre dos, por

M-m, multiplicando por el 50 el cociente resultante, a fin de evitar el uso de números fraccionarios.

La fórmula de **Emberger**, involucra el término M+m entre dos, que representa el promedio de las temperaturas medias extremas y el binomio M-m, que significa la oscilación de temperatura media anual. Ambos términos pretenden ser una medida tanto de la evaporación como del grado de continentalidad de un lugar.

4) Zonas de Vida.

Holdridge (1979), da un amplio reconocimiento a las variables climáticas al mencionar que la precipitación, la temperatura y la humedad definida como la resultante de la interacción entre los dos primeros, constituyen un adecuado criterio para clasificar asociaciones naturales. Sin dejar de reconocer la existencia de factores locales, tales como la topografía, la exposición o la calidad del suelo, utiliza estas variables climáticas por el significado biológico que ellas encierran y por la disponibilidad de estos datos en muchos lugares del mundo.

Esta clasificación se utiliza en el trópico, la cual aplica un esquema o diagrama para la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo.

Las zonas de vida constituyen asociaciones relacionadas entre sí por medio de los efectos de la temperatura, la precipitación y la humedad. En las zonas están definidas de manera precisa y específica los tres elementos climáticos principales.

Holdridge sostiene que existe una equivalencia muy precisa entre estas variables climáticas y las asociaciones naturales que él denomina zonas de vida. Desde el punto de vista climático, define estas unidades como el conjunto de ámbitos específicos de los elementos climáticos principales: temperatura, precipitación y humedad. (Figura 2.1). La humedad, debidamente jerarquizada, es utilizada como un índice climático de significado biológico. Este índice aparece en la parte inferior de la Figura 2.1 bajo el título "Provincias de humedad" y se calcula dividiendo la evapotranspiración potencial anual (ETP) entre la precipitación anual (P), sin olvidar que ETP es una función lineal de la temperatura ($ETP = \text{Biotemperatura} \times 58.93$) y donde la biotemperatura corresponde a las temperaturas medias de los valores superiores a 0°C e inferiores a 30°C. El índice nos permite clasificar la zona de vida a que corresponde un lugar determinado, conociendo sus valores anuales de precipitación y evapotranspiración potencial.

García Benavides (1979) propone que para lograr una homogeneidad climática puede seguirse la Clasificación de Holdridge (1967) referente a las formaciones vegetales del mundo como se presenta en el cuadro 2.1.

Por ejemplo en Santiago de Puriscal (Jochen, et al, 1986), con una precipitación anual de 2,145 mm. y una evapotranspiración potencial anual de 1,567 mm., nos da un índice de vida del bosque húmedo. Es interesante hacer notar que esta zona de vida (bosque húmedo) se extiende hasta los 6°C, a partir de los cuales comienza a ser sustituida por La Puna, para pasar luego a la tundra. También se puede considerar que el citado índice tiene significado antropológico, debido a que la calidad climática del ambiente aumenta hacia el valor de uno del índice. Esto se retifica por el hecho de que los mayores asentamientos humanos se han desarrollado en lugares que presentan un valor del índice cercano a uno.

Cuadro 2.1. Clasificación de Holdridge para las Formaciones Vegetales. (García Benavides, 1979).

FORMACION VEGETAL	PRECIPITACION	TEMPERATURA
Bosque Seco Tropical	1000-2000	> 24°
Bosque Húmedo Premontano	1000-2000	24° -17°
Bosque Húmedo Montano Bajo	1000-2000	17° -12°
Bosque Muy Seco Tropical	500-1000	> 24°
Bosque Seco Premontano	500-1000	24° -17°
Bosque Seco Montano Bajo	500-1000	17° -12°
Bosque Húmedo Montano	500-1000	12° -6°
Monte Espinoso Tropical	250-500	> 24°
Monte Espinoso Premontano	250-500	24° -19°
Estepa Espinosa Montano Bajo	250-500	17° -12°
Maleza Desértica	125-250	cualquiera
Desierto	> 125	cualquiera

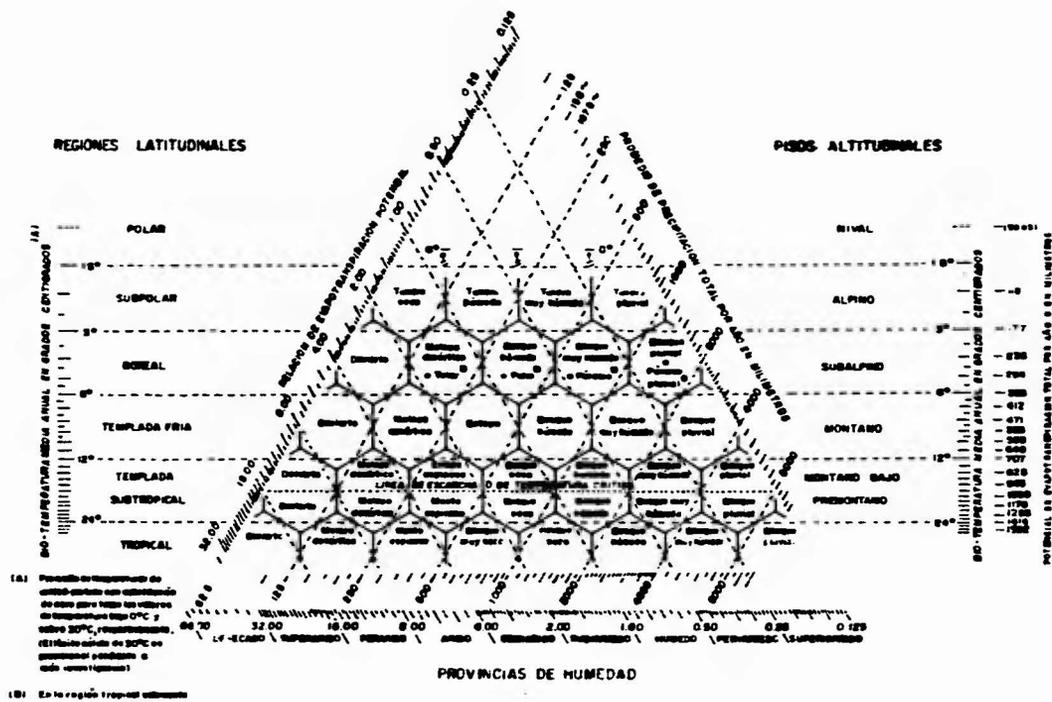


Figura 2.1 Diagrama para la clasificación de Zonas de Vida o formaciones vegetales del mundo. L.R. Holdridge. (Jochen, et al. 1986).

La determinación de las zonas de vida mediante el uso de variables climáticas jerarquizadas constituye una base cualitativa sobre la cual se han practicado clasificaciones en muchos países, especialmente del trópico y subtropical americano.

Las dos diferencias principales entre este sistema y los demás son, en primer lugar, el uso de la biotemperatura (temperaturas superiores a 0°C e inferiores a 39°C) y, en segundo lugar, la escala logarítmica utilizada para expresar los valores de la precipitación.

El diagrama de las zonas de vida es una representación de las zonas de vida más comunes en el planeta y se aplica para ambos hemisferios. Este diagrama representa un conjunto tridimensional de zonas de vida en regiones y fajas altitudinales.

2.5 Clasificaciones climáticas que usan la precipitación y la evapotranspiración como factores taxonomicos

1) Clasificaciones de Thornthwaite.

Thornthwaite publicó varias clasificaciones climáticas de 1931 a 1948. En la primera, la planta fue considerada como una medida de todos los elementos integrados del clima. La delimitación en provincias, según el grado de humedad fue trazada de acuerdo con la efectividad de la precipitación. Un punto débil del sistema, sin embargo, era debido a que los datos de evaporación solamente eran leídos en pocas de las estaciones meteorológicas, dificultando la elaboración de mapas de efectividad de la humedad. Por lo que propuso una metodología para evaluar la disponibilidad de agua en función de la precipitación, la temperatura y el tipo de suelo, ésta establece un promedio entre la ganancia de agua por precipitación y la pérdida por evapotranspiración. La evapotranspiración potencial (ETP) se calcula como una función de la temperatura.

Cuando el suelo se ha saturado y la precipitación supera a la evapotranspiración potencial, se produce exceso de agua. Cuando la precipitación no es capaz de compensar la pérdida de agua por evapotranspiración, se produce un déficit en el suelo. Con estos parámetros propuso Thornthwaite los índices que constituyen la base de su clasificación climática. Estos índices son:

$$\text{Indice de humedad} = \frac{100 \times \text{exceso de agua}}{\text{evapotranspiración potencial anual}}$$

$$\text{Indice de Aridez} = \frac{100 \times \text{deficiencia de agua}}{\text{evapotranspiración potencial anual}}$$

Con estos dos últimos índices, se obtiene la variación estacional de la disponibilidad hídrica, aplicando el índice de aridez a los climas húmedos y el índice de humedad a los climas secos. Con ellos se comprueba si existen períodos de deficiencia en climas húmedos, o bien períodos de adecuada o excesiva agua en los climas secos. Estos dos índices son integrados por Thornthwaite en el índice hídrico, el cual es utilizado para determinar los tipos climáticos de humedad:

$$\text{Indice hídrico} = \frac{(100 \times \text{exceso agua}) - (60 \times \text{deficiencia agua})}{\text{evapotranspiración potencial}}$$

El índice hídrico calcula el balance de agua para todo el año. De este modo, los meses en los cuales se presenta un déficit de agua, es decir, aquellos en los que la evapotranspiración es mayor que la precipitación, son equilibrados en cierta medida por aquellos en que hay un exceso de agua. Esto significa que el agua que no se utiliza en los períodos que presentan un exceso, sigue estando presente en el suelo en las épocas en que la evaporación es mayor que la precipitación. Debido a lo anterior, el exceso de agua tiene en la fórmula un mayor peso (100) que el déficit (60).

Para utilizar las fórmulas anteriormente expuestas, es preciso conocer los valores de la evapotranspiración, los cuales no siempre están disponibles. A fin de compensar esto, Thornthwaite desarrolló el índice de eficiencia de la precipitación (PE) :

$$PE = \frac{P}{E} = 115 \left(\frac{P}{T - 10} \right) 10/9$$

donde:

P = precipitación mensual en pulgadas
 E = evaporación mensual en pulgadas
 T = temperatura en grados fahrenheit

El índice anual se establece con la suma de los índices mensuales. Este índice fue utilizado por el autor mencionado para definir los tipos de clima según la escala siguiente:

Índice PE	Clima	Tipo de Vegetación
> 128	muy húmedo	bosque húmedo hasta bosque pluvial
64-128	húmedo	bosque seco hasta bosque húmedo
32-64	subhúmedo	sabana
16-32	semihúmedo	estepa
< 16	árido	desierto

Los índices elaborados por **Thornthwaite** tienen validez para largos períodos de tiempo, como se indicó anteriormente, y para grandes extensiones territoriales. Sin embargo, para planificar las operaciones agrícolas en los terrenos, sobre todo en aquellos en los que existe una marcada estacionalidad, como es el caso de las regiones tropicales lluviosas, es necesario buscar indicadores más sensibles. Esto se puede realizar basándose en la conocida relación entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP). De acuerdo con este criterio Jochen (1986) elaboró el siguiente calendario para definir ciertos períodos de actividades agrícolas:

Períodos	Rangos
1. Preparación del suelo	P=ETP/10 a P=ETP/4
2. Siembra y desarrollo juvenil	P=ETP/4 a P=ETP/2
3. Desarrollo vegetativo inicial	P=ETP/2 a P=ETP
4. Desarrollo pleno	P > ETP
5. Maduración	P=ETP a P=ETP/4
6. Cosecha	P=ETP/10

En la clasificación de 1948, fue introducido el concepto de evapotranspiración potencial. Los límites climáticos fueron determinados por comparación de la

precipitación con el potencial de evapotranspiración, dos medidas enteramente meteorológicas. Por consiguiente, la vegetación no fue por más tiempo el criterio determinante, los límites fueron establecidos solamente por antecedentes climáticos. La falta de datos adecuados sobre evapotranspiración retardó durante muchos años la aceptación y uso de este sistema, últimamente se ha extendido bastante su aplicación en los estudios microclimáticos. Este autor para clasificar los climas derivó el siguiente índice de humedad (Im) :

$$Im = Ih - 0.6 \times Ia$$

donde:

Im = Índice de humedad
 Ih = 100 S/n = Índice húmedo
 Ia = 100 d/h = Índice de aridez
 S = exceso de agua
 d = déficit de agua
 n = agua requerida

De lo cual se definieron los tipos de clima según la escala siguiente:

Tipo de Clima	Indice de Humedad
A muy húmedo	> de 100
B4 húmedo	80 a 100
B3 húmedo	60 a 80
B2 húmedo	40 a 60
B1 húmedo	20 a 40
C2 subhúmedo	0 a 20
C1 subhúmedo-seco	- 20 a 0
D semiárido	- 40 a - 20
E árido	- 60 a - 40

Clasificación de Thornthwaite y Mather (1955), estos autores modificaron la fórmula anterior y propusieron la siguiente:

$$Im = 100 \left(\frac{P}{ETP} - 1 \right)$$

donde:

Im = Índice de humedad
 P = Precipitación media anual (mm)
 ETP = Evapotranspiración potencial media anual (mm)

Y los rangos de la clase climática quedaron de acuerdo a los siguientes valores:

Tipo de Clima		Indice de Humedad	
A	muy húmedo	>	a 100
B4	húmedo	80	a 100
B3	húmedo	60	a 80
B2	húmedo	40	a 60
B1	húmedo	20	a 40
C2	subhúmedo	0	a 20
C1	subhúmedo-seco	-33.3	a 0
D	semiárido	-66.7	a -33.3
E	árido	-100	a -66.7

2) Índice de Disponibilidad de Humedad (IDH) Hargreaves 1977.

En 1977, Hargreaves propone un índice de disponibilidad de humedad (IDH) como base para su clasificación agroclimática. El índice propuesto, calculado mensualmente, se obtiene dividiendo la precipitación probable (PP) entre la evapotranspiración potencial (ETP):

$$\text{IDH} = \text{PP}/\text{ETP}$$

donde:

PP = es la precipitación que se espera que se produzca con una probabilidad del 75%.

ETP = se calcula de la siguiente forma:

$$\text{ETP} = 1.0075 \times \text{RSM} \times \text{TMF}$$

en donde:

RMS = es igual a los milímetros de evaporación por mes de acuerdo con la radiación solar, ajustada al número de días por mes.

TMF = es la temperatura media en grados Fahrenheit.

La probabilidad de precipitación señalada se justifica basándose en que para la mayoría de los cultivos se recomienda una cantidad de precipitación igual o superior a

la caída durante las tres cuartas partes del promedio anual de los años registrados. Esto permite que esta probabilidad sea usada como la medida de la disponibilidad o confiabilidad de la precipitación. (Jochen, et al. 1986).

De lo anterior, Hargreaves apuntó que, para algunos cultivos o condiciones especiales, un nivel de probabilidad diferente al 75% puede ser más apropiado. Para la India, por ejemplo, consideró un IDH de 0.25 como el límite para la sequía moderada, y uno de 0.50 para la estación de crecimiento.

Propone el autor un límite crítico para cultivos de 0.33 como mínimo y sugiere una clasificación de tipos climáticos y de aptitud agroclimática en función de los valores del índice de disponibilidad de humedad (IDH) y su frecuencia en el año.

Es decir, si el IDH se sitúa entre 0 y 0.33 en todos los meses de una región, el clima de ésta es clasificado como árido; si se dan sólo dos meses en el año con valores que exceden de 0.34, el clima es clasificado como árido, y si durante 3 o 4 meses consecutivos los valores superan 0.34, es considerado como semiárido.

Por ejemplo, si tenemos una evaporación mensual de 200 mm, de acuerdo con la radiación (que se estima en 400 langley/día) y una temperatura media mensual de 80° F (26.7°C) , ETP será de :

$$ETP = 0.0075 \times 200 \times 80 = 120 \text{ mm.}$$

Y la precipitación es de 100 mm. por mes, el índice sería: $IDH = 100/120 = 0.83$.

Este índice se utiliza para caracterizar al mes, basándose en las categorías presentadas en el cuadro 2.2.

Cuadro 2.2 Categorías de Humedad según el índice mensual IDH propuesto por Hargreaves. (Hargreaves, 1976).

IDH	CATEGORIA
0.00 a 0.33	Muy deficiente
0.34 a 0.67	Moderadamente deficiente
0.68 a 1.00	Algo deficiente
1.01 a 1.33	Adecuado
1.34 y más	Excesivo

Este procedimiento puede utilizarse también para caracterizar períodos más cortos. Arze (1982) calculó la sequía interestival en el El Salvador, teniendo en cuenta los sitios que reciben menos de 50 mm. de precipitación, durante períodos de 10 días (decádicos) equivalentes al valor promedio de la evapotranspiración potencial de cada diez días durante el verano. Dulin (1982) realiza la distribución de la sequía en Centroamérica, a partir del número de meses con precipitación inferior a 50 mm, umbral seleccionado empíricamente.

2.6 Clasificaciones climáticas basadas en la duración de humedad disponible en el suelo

1) Clasificación de Troll.

Troll (1965) propuso el siguiente índice basado en datos de precipitación y evapotranspiración potencial para clasificar los climas calientes de acuerdo a la duración de humedad en el suelo y tipo de vegetación.

$$I = P / ETP$$

donde: I = Índice de Humedad
P = Precipitación media mensual
ETP = Evapotranspiración potencial media mensual

Este autor dividió los climas calientes de acuerdo al número de meses húmedos en las siguientes clases:

Tipos de Vegetación	Meses
Bosque tropical lluvioso	9.5 - 12
Sabana (húmeda)	7 - 9.5
Sabana (seca)	4.5 - 7
Sabana (matorral espinoso)	2 - 4.5
Semiárida	1 - 2
Desierto	0 - 1

Un mes húmedo es aquél en donde la precipitación media es mayor que la evapotranspiración potencial media.

$$MES\ HUMEDO = P / ETP\ mayor\ a\ 1$$

2) Método de Cochemé y Franquin.

Cochemé y Franquin. (1967), utilizaron la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP) para la categoría la condición de humedad. Los límites de P/ETP y las condiciones de humedad correspondientes se presentan a continuación.

Límites de P/ETP		Condición de Humedad
P	> ETP	Húmedo
ETP	> P > ETP/2	Periodo con humedad moderada
P	= ETP/2 a ETP/4	Periodo moderadamente seco
P	= ETP/4 a ETP/10	Periodo seco
P	< ETP/10	Periodo muy seco

3) Clasificación de Hargreaves.

Hargreaves (1971), propuso un índice de humedad disponible (IHD), donde utilizó para su cálculo un valor de probabilidad de lluvia de 75%, en lugar de la lluvia total. El índice propuesto por este autor es como sigue:

$$\text{IHD} = 75\% \text{ probabilidad de lluvia ETP.}$$

El IHD y su correspondiente condición de humedad se presenta a continuación:

IHD	Condición de Humedad
0.00 - 0.33	Muy deficiente
0.34 - 0.67	Moderadamente deficiente
0.68 - 1.00	Ligeramente deficiente
1.00 - 1.33	Humedad adecuada
> 1.34	Humedad excesiva

4) Clasificación de Papadakis.

Papadakis (1975), propuso otro índice donde además de la precipitación, incluyó la humedad del suelo:

$$H = P + W / \text{ETP}$$

donde:

H = Índice de humedad
P = Precipitación mensual

ETP = Evapotranspiración potencial
 W = Humedad almacenada en el suelo

Papadakis sugirió la fórmula siguiente para estimar la evapotranspiración potencial mensual:

$$ETP = 5.62 (ema - ed)$$

donde:

ema = presión de vapor saturada (mb) a la temperatura máxima diaria promedio
 ed = promedio mensual de presión vapor (mb)

2.7 Clasificaciones para evaluar para el potencial climático para la agricultura

Este tipo de clasificaciones puede desarrollarse a diferentes niveles. Desde el punto de vista del análisis del ambiente físico, éstas pueden realizarse a nivel agroclimático, o a nivel agro-ecológico.

Una clasificación agroclimática involucraría el análisis de información del clima en combinación con información de cultivos.

Por otro lado, una clasificación agro-ecológica incluiría además de la información de clima y vegetación, información de factores limitativos de suelo (profundidad, drenaje, salinidad, pendiente, etc.), de factores limitativos agroclimáticos, como por ejemplo, el efecto del clima sobre la incidencia y reducción del rendimiento causada por plagas, enfermedades, malezas, etc., y por último una clasificación agro-ecológica involucraría también el nivel tecnológico de producción (bajo o alto).

Villalpando (1984), describe algunas características que deberían de considerarse al realizar una evaluación del potencial climático para la agricultura, basado en una caracterización agroclimática regional.

1. Establecer límites entre las regiones geográficas con macroclimas diferentes, por ejemplo:

Trópicos: temperatura media para todos los meses del año mayor de 18°C.

Subtropicales: temperatura media para algunos de los meses del año menor de 18°C.

2. Estratificar áreas con potencial diferente para la agricultura de acuerdo al cálculo y la estimación de los factores que incluiría una caracterización agroclimática. Estos factores deben estimarse usando los totales y los promedios de los elementos climáticos para períodos cortos de tiempo (intervalos de 7 a 10 días). La caracterización agroclimática involucra a los siguientes elementos:

a) Inicio, terminación y duración de la estación de crecimiento para diferentes niveles de probabilidad previamente establecidos.

b) Promedio de temperatura, temperaturas máximas y mínimas diarias durante la estación de crecimiento. La temperatura media durante el período de crecimiento podría usarse para estratificar áreas donde esta temperatura sea:

- T media mayor de 20°C (apta para cultivos con fotosíntesis tipo C4):

- T media menor a 20°C (apta para cultivos con fotosíntesis tipo C3).

c) Unidades calor, unidades fototérmicas y unidades frío estimadas para diferentes especies potenciales para el período de la estación de crecimiento y los períodos de dormancia en el caso de frutales caducifolios.

d) Régimen y distribución de radiación solar expresado en cal/cm²/día durante la estación de crecimiento.

e) Cálculo de probabilidades de lluvia para cada intervalo dentro de la estación de crecimiento para usarse como una alternativa para evaluar el régimen de humedad.

f) Estimación de la evapotranspiración potencial, anual y durante la estación de crecimiento.

g) Estimación de índices de sequía y/o exceso de humedad a partir de un balance de humedad para varias profundidades de suelo y niveles probables de lluvia.

h) Estimación del rendimiento potencial, para varias especies nativas o cultivadas que sean potenciales para la región.

i) Preparación de tablas, gráficas y mapas de la información obtenida, incluyendo ejemplos para su mejor aplicación en agricultura.

Es pertinente señalar, que al llevar a cabo una caracterización agroclimática, ésta no solamente se utilizaría para zonificar cultivos de acuerdo a su potencial, sino que sería también el marco de referencia agroclimático que auxiliaría a todos los investigadores en el planteamiento de hipótesis de investigación con bases objetivas expresadas en términos cuantitativos, y no basadas en criterios cualitativos a veces muy subjetivos.

Por último, la información obtenida de una evaluación de los recursos agroclimáticos en una región, es una herramienta útil que debiera tenerse siempre al planificar el uso de los recursos naturales a actividades agrícolas, pecuarias o forestales.

2.8 Clasificaciones para uso en la transferencia de tecnología agrícola

Algunas características de este tipo de clasificaciones se mencionan a continuación:

1. En este tipo de clasificaciones es necesario entender las limitaciones climáticas de los cultivos en las diferentes regiones, a fin de modificar y transferir tecnología en el uso de manejo de agua, suelo y patrón de cultivos.
2. Llevar a cabo estudios sobre el efecto que causa a un cultivo el déficit o exceso de un elemento climático (precipitación, temperatura, etc.,). Esto debe ser evaluado usando periodos cortos de tiempo (5-10 días).

Para estimar la variabilidad en rendimiento se requiere desarrollar y validar un modelo donde el rendimiento esté en función de la variabilidad climática. Este modelo agroclimático puede ser desarrollado usando datos de rendimiento experimentales o comerciales y contar con al menos 20 años de datos de clima para llevar a cabo la estimación de variabilidad en rendimiento para un cultivo.

2.9 Representaciones gráficas de la información climatológica

El gráfico que representa la evolución de las temperaturas y de las precipitaciones a lo largo de un año, recibe el nombre de **climograma**.

Fue utilizado por primera vez por J. Ball en su obra *Climatological Diagrams* (1910).

Puesto que el climograma representa el régimen térmico y pluviométrico de un clima, no debe construirse con las observaciones de un solo año, sino que lo ideal es utilizar medias obtenidas durante un período de observaciones de unos treinta años.

El climograma se construye sobre ejes de coordenadas. Sobre los ejes verticales se señalan las temperaturas en grados centígrados y las precipitaciones en milímetros, éstas a doble escala que aquélla.

En el eje horizontal se marcan los meses del año. Para cada mes se llevan al gráfico los datos de precipitación y temperatura. Una vez unidos los puntos resultantes se obtienen dos curvas.

Cuando la curva de precipitaciones queda por debajo de la de temperaturas estamos en un período seco, como ocurre en los meses de mayo, junio, julio y agosto en Catalao, Brasil. (Figura 2.2.).

En caso contrario, estamos ante meses húmedos, como ocurre en los restantes.

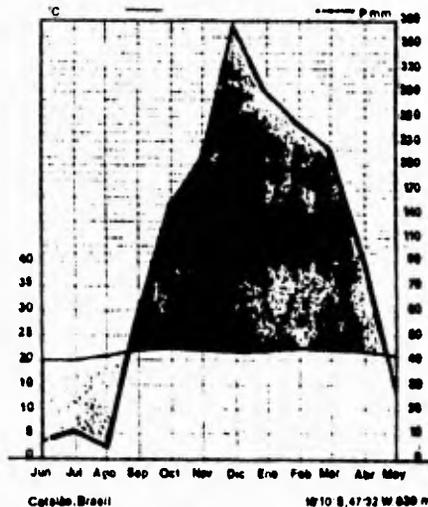


Figura 2.2 Climograma para Catalao, Brasil. (Toharia, 1984).

Walter y Lieht, en 1960, desarrollaron un sistema similar a J. Ball, el cual ha sido mundialmente aceptado como CLIMADIAGRAMA, estos diagramas se caracterizan por su sencillez y claridad, toman en cuenta precipitación y temperaturas en sus promedios mensuales y los valores extremos de la temperatura, los cuales los consideran como

los más estrechamente relacionados con el comportamiento de las plantas.

Con la ayuda de las mediciones de la temperatura es posible obtener informaciones sobre la evapotranspiración. Los elementos señalados y sus interrelaciones son los que determinan la cantidad de agua disponible para las plantas, de ahí su importancia.

Constataciones empíricas han demostrado que la representación gráfica más simple y efectiva para expresar la relación entre la cantidad de lluvias y el potencial de la evapotranspiración es 2:1. En el gráfico, esto se manifiesta en la relación entre las escalas usadas para representar la precipitación y la temperatura, en donde 10°C corresponden a 20 mm de precipitación.

Al igual que el climograma de J. Ball, la construcción del climadiagrama, los promedios mensuales de precipitación y de temperatura se sitúan sobre los meses del año (de enero a diciembre), estos puntos se unen en una curva de precipitación y otra de temperatura, considerando que si la curva de precipitación pasa por debajo de la curva de temperatura se trata de un período seco o árido, al contrario se trata de un período húmedo. La superficie entre las curvas de precipitación y de temperatura se rayan para indicar períodos húmedos, la superficie entre las curvas de precipitación y de temperatura se rayan para indicar períodos húmedos, la superficie correspondiente a períodos áridos se puntean. En las regiones tropicales e intertropicales, la precipitación mensual muchas veces supera los 100 mm. en estos casos se cambia la escala a 1:10, con lo cual, a partir de los 100 mm, cada unidad representa en vez de 10 mm, 100 mm. La superficie comprendida entre la curva y la línea que señala los 100 mm se sombrea y representa períodos perhúmedos.

Es necesario indicar que, aún cuando la temperatura y la precipitación no son los únicos elementos climáticos que determinan el desarrollo de la vegetación, sí son los más importantes. La importancia radica en la estrecha relación que guardan con los otros elementos; por ejemplo, la temperatura nos da una idea de la radiación y de la evapotranspiración imperantes, lo cual unido al dato de precipitación permite formarnos una imagen bastante clara de la disponibilidad de agua y, por tanto de la vegetación adecuada (potencial). A lo anterior, se suma el hecho de que ambos elementos son fáciles de medir y de representar en un gráfico, lo cual es el objetivo del climadiagrama.

Junto al nombre de la estación del lugar representado se suele indicar la altitud del lugar, los años de mediciones, el promedio anual de temperatura y de humedad relativa como también el total de la precipitación anual.

Por convención, cada una de estas informaciones se ubica siempre en un lugar determinado del climadiagrama, lo cual permite siempre saber de qué información se trata.

En la Figura 2.3, se presenta un climadiagrama modelo donde se incluye la información comúnmente utilizada. Un detalle importante en la construcción del climadiagrama es que los valores de precipitaciones y temperatura se puntean entre las barras que designan los meses del año.

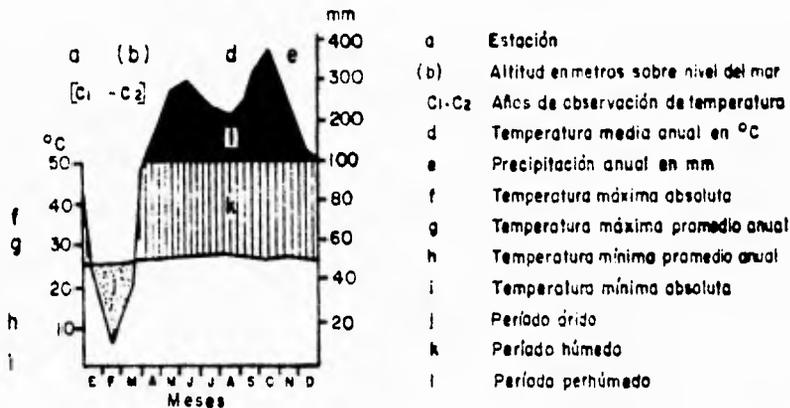


Figura 2.3 Climadiagrama Modelo. Walter y Lieht. (Jochen, et al. 1986).

Para el Dr. C. Warren Thornthwaite el climograma es una representación gráfica de algunos factores climáticos y tiene por objeto esquematizar las condiciones del balance de agua de una zona determinada.

Los datos que se utilizan son: Temperatura media y precipitación media.

Por medio de un estudio de correlación entre estos elementos se obtuvieron las siguientes fórmulas:

$$i = 1.64 \left(\frac{P}{t + 12.2} \right) 10/9$$

Fórmula (1) (para cálculo del índice de precipitación)

$$i' = \frac{9t}{20}$$

Fórmula (2) (para cálculo del índice de temperatura)

donde:

- i = Índice mensual de la efectividad de la precipitación.
- i' = Índice mensual de la eficiencia de la temperatura.
- p = Precipitación mensual en mm.
- t = Temperatura media mensual en °C.

Aplicando las fórmulas anteriores para cada lugar del que se tenga estos datos mensuales, se obtendrán doce valores de i y doce valores de i', correspondientes a los doce meses del año; a estos valores se les llama I y I':

I = Índice de efectividad de la precipitación.

I' = Índice de la eficiencia de la temperatura.

A continuación se darán los valores de estos índices (I y I'), calculados por el Dr. Warren Thornthwaite, modificado por el Ing. Alfonso Contreras Arias, para ser aplicado en nuestro país, y se ejemplificarán para la ciudad de Zapopan, Jalisco (Figura 2.4).

Categorías climatológicas en relación con la humedad			
Valor de Índice I	Carácter del Clima	Vegetación Características	Símbolo
128 ó mayor	Muy húmedo	Selva	A
64 a 127	Húmedo	Bosque	B
32 a 63	Semi-Seco	Pastal	C
16 a 31	Seco	Estepa	D
Menor de 16	Muy Seco	Desierto	E

$$i' = \frac{9t}{20}$$

Fórmula (2) (para cálculo del índice de temperatura)

donde:

- i = Índice mensual de la efectividad de la precipitación.
- i' = Índice mensual de la eficiencia de la temperatura.
- p = Precipitación mensual en mm.
- t = Temperatura media mensual en °C.

Aplicando las fórmulas anteriores para cada lugar del que se tenga estos datos mensuales, se obtendrán doce valores de i y doce valores de i', correspondientes a los doce meses del año; a estos valores se les llama I y I':

I = Índice de efectividad de la precipitación.

I' = Índice de la eficiencia de la temperatura.

A continuación se darán los valores de estos índices (I y I'), calculados por el Dr. Warren Thornthwaite, modificado por el Ing. Alfonso Contreras Arias, para ser aplicado en nuestro país, y se ejemplificarán para la ciudad de Zapopan, Jalisco (Figura 2.4).

Categorías climatológicas en relación con la humedad			
Valor de Índice I	Carácter del Clima	Vegetación Características	Símbolo
128 ó mayor	Muy húmedo	Selva	A
64 a 127	Húmedo	Bosque	B
32 a 63	Semi-Seco	Pastal	C
16 a 31	Seco	Estepa	D
Menor de 16	Muy Seco	Desierto	E

Categorías climatológicas en relación con la temperatura

Valor del Índice I'	Carácter del Clima	Símbolo
128 ó mayor	Cálido	A'
101 a 127	Semi-Cálido	B'1
80 a 100	Templado	B'2
64 a 79	Semi-Frío	B'3
32 a 63	Frío	C'
16 a 31	De Taiga	D'
1 a 15	De Tundra	E'
0	Polar	F'

Hasta aquí, se ha hecho referencia a las jerarquías de humedad y de temperatura que corresponden a un clima, es decir, a sus categorías térmicas o higrométricas. Ahora falta por calificar la distribución de la humedad y la variación de la temperatura a través del año, que constituyen particularidades muy importantes en cada caso.

Características de la distribución de la precipitación

Símbolo:

- r: - - - - Sin estación seca bien definida.
- i: - - - - Con invierno seco.
- p: - - - - Con primavera seca.
- v: - - - - Con verano seco.
- o: - - - - Deficiencia de lluvia en todas las estaciones.

De estos símbolos se pueden emplear uno solo, dos o tres en la caracterización de un clima, según el número de meses secos. Para que una estación del año sea calificada como seca, se requiere que por lo menos dos de sus meses sean secos, o en su defecto, se considera seco todo un mes para el cual resulta el valor P/E menor que la unidad.

Tipo de Variación de la Temperatura a través del año.

Para calificar el tipo de variación de la temperatura a través del año por este sistema, se calcula el tanto por ciento que representa la suma de los índices mensuales i' de los meses de verano, en el índice anual In; se reconocen cinco tipos:

Símbolo	Concentración de la eficiencia térmica en el trimestre más caliente del año (%)		Carácter
a'	De 25	a 29	Sin cambio térmico invernal bien definido.
b'	De 30	a 34	Con invierno benigno.
c'	De 35	a 49	Extremoso.
d'	De 50	a 69	Muy extremoso
e'	De 70	a 100	Extremosísimo.

Ejemplo del cálculo del clima por el primer método del Dr.
W. Thornthwaite. Estación Zapopan, Jalisco.

Datos					
	lluvia	temperatura		lluvia	temperatura.
E	14.7	17.6	J'	243.3	22.2
F	9.6	18.9	A'	213.8	22.4
M	5.9	21.0	S	147.8	22.2
A	6.1	24.7	O	64.8	21.3
M'	23.2	24.7	N	13.9	18.9
J	188.0	23.8	D	15.0	17.7
ANUAL:				946.5	21.3

Cálculo del índice mensual de la efectividad de precipitación.					
E	0.7479	J'	14.4154	$i = 1.64 \left(\frac{P}{t + 12.2} \right)^{10/9}$	
F	0.4443	A'	12.4067		
M	0.2405	S	8.2915		
A	0.2220	O	3.4136		
M'	0.9793	N	0.6703		
J	10.2911	D	0.7790		
I = 52.9016					

CLIMOGRAMA
 ESTACION ZAPOPAN, JAL.
 CLASIFICACION DEL CLIMA C(i)B'(d)
 SEMI-SECO, CON INVIERNO SECO;
 SEMI-CALIDO, SIN CAMBIO TERMICO
 INVERNAL BIEN DEFINIDO.

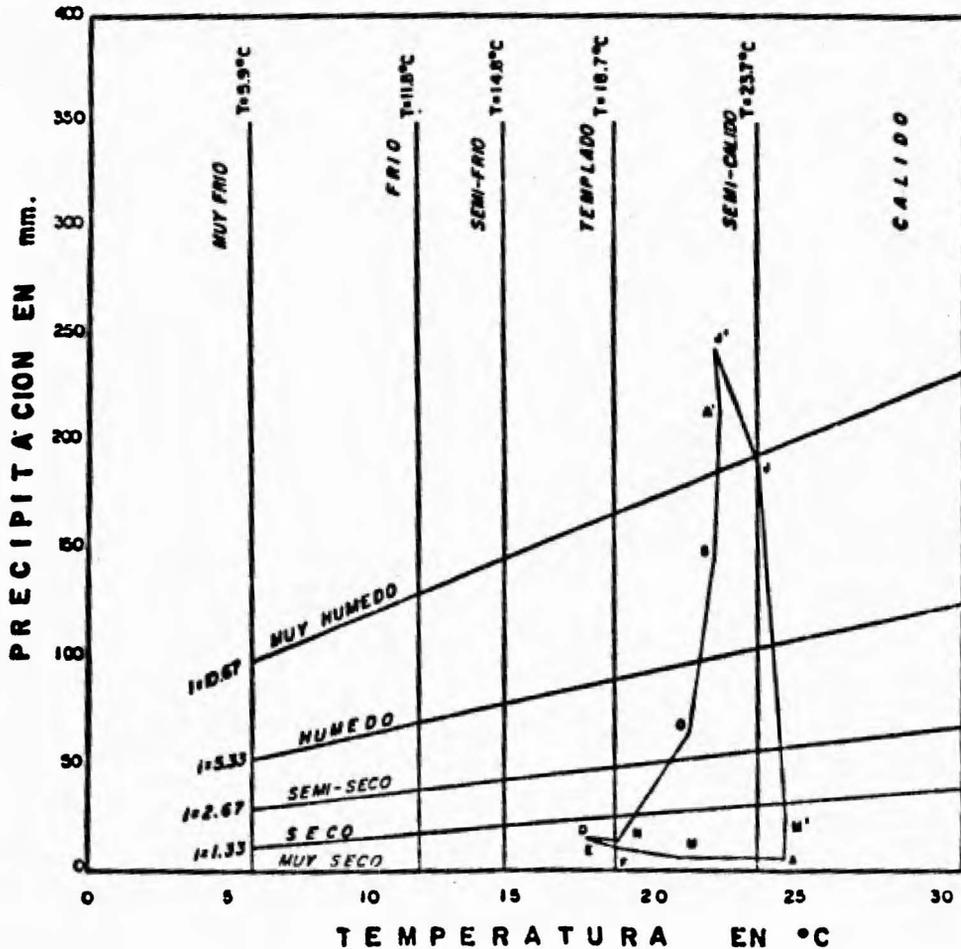


Figura 2.4 Climograma de Thornthwaite, para la estación Zapopan, Jal. (Thornthwaite, s/f).

Cálculo del índice mensual de la efectividad en relación a la temperatura

E	7.9200	J'	9.990	
F	8.5050	A'	10.0800	
M	9.45000	S	9.9900	$i' = 9t$
A	11.1150	O	9.5850	--
M'	11.1150	N	8.5050	20
J	10.7100	D	7.9650	
<hr/>				
$I' = 144.9300$				

Tipo de variación de la temperatura a través del año

J'	9.9900
A'	10.0800
S	9.9900

$$30.06 = 114.9300 = 0.2616 = 26.2\%$$

Clima: C (i) B'1 (a'). Semi-seco con invierno seco; semi-cálido, sin cambio térmico invernal bien definido.

Restrepo (1980), citado por Herrera (1991), establece gráficamente tres periodos en el año dependiendo del estado de humedad prevaleciente, los cuales son necesarios para determinar el período en el cual se encuentran las características adecuadas para que las plantas cubran sus necesidades atmosféricas; para ello, utiliza el criterio de Bagnouls y Gaussen (1953), citados por García (et al 1983), en el trazo de una gráfica ombrotérmica, que es un diagrama que presenta la temperatura y la precipitación en el eje de las X se anotan los meses del año y sobre el de las Y hay dos escalas, la de la izquierda se emplea en el trazo de la gráfica de temperatura anual (mes por mes) y la de la derecha, la gráfica de precipitación; la condición es que la escala de la precipitación será el doble que la de temperatura y los define de la siguiente forma:

a) Seco.- Como el periodo en el cual la curva de precipitación se encuentra abajo de la de temperatura.

b) Húmedo.- Cuando la curva de precipitación se encuentra sobre la de temperatura hasta alcanzar los 100 mm de precipitación.

c) Muy Húmedo.- Cuando la curva de precipitación se encuentra encima de los 100 mm.

García (*op.cit*) propone algunas modificaciones al criterio de Bagnouls y Gaussen (1953), considerando que la relación $P = 2t$ (Escala de precipitación el doble de la temperatura), es exclusivamente para régimen de lluvia de invierno, por lo que para otros regímenes pluviométricos, considera válido el uso de las fórmulas propuestas por Köppen (1931), citado por García (1964), como son: $P = 2t + 14$ para lluvias en todas las épocas del año y $P = 2t + 28$ para lluvias en verano, por extensión, sería válida la fórmula $P = 2t + 21$ propuesta por la misma García (*op. cit.*) para los lugares que presentan lluvia de verano, pero que poseen un porcentaje elevado de lluvia invernal (mayor de 10.2 de la anual). En la figura 2.5 se muestra un ejemplo para Laguna de Fresno, Michoacán.

Otra utilidad que se les da a las representaciones gráficas, es calcular la sequía intraestival.

Sequía intraestival.

Mosiño y García (1966), citados por Reyna (1970), estudiaron la sequía intraestival y la definen como una disminución o receso temporal en la cuantía de la precipitación a mediados de la época lluviosa, como se puede notar de los meses de mayo a septiembre en la figura 2.2.

La sequía intraestival no representa una sequía absoluta sino una reducción en el número de días con lluvia en la Temporada lluviosa del año, el déficit se estima tomando el receso de precipitación, al área del polígono funicular formado por los puntos extremos de las alturas medias mensuales de la lluvia entre los dos máximos de la precipitación y la recta que une los puntos extremos de estos (Flores E. 1984).

La fracción expresada en porcentaje que resulta de dividir el área representa el déficit entre la precipitación total de mayo a octubre es la cifra que indica la intensidad de la sequía intraestival o sequía relativa.

$$\% \text{ Sequía Relativa} = \frac{\text{Área del Polígono Funicular}}{\text{Precipitación (Mayo-Octubre)}}$$

García B. (1982), señala que las interrelaciones de estudios agroclimáticas y fitioedáficas a distintos niveles de detalle darán lugar a resultados con un gradiente de precisión denominado "zonificación de punto", que pertenece a un nivel de precisión estricto y tiene como principal objetivo, llevar a cabo un análisis exhaustivo, de los rendimientos que se pueden alcanzar en una localidad, punto o conjunto de puntos con suficiente información climatológica y edáfica. Con esta zonificación, se puede presentar el análisis espacio-tiempo, que permite conocer la distribución de los rendimientos en el espacio geográfico y en el tiempo para cada localidad o punto, así como interrelacionarlo con variables de manejo que permiten optimizar el rendimiento y el ingreso a través de modelos de riesgo; a este nivel de precisión se consideran como variables edafoclimáticas de mayor impacto, a la tensión del agua en el suelo y su transcurso diario.

Como análisis especial complementario, se determinan las probabilidades de lluvia y puede ser usado para análisis de riesgo de sequía.

Debido a la cantidad de información requerida para realizar la zonificación anteriormente mencionada, ésta es muy difícil de emplearse en México, debido a la falta de parámetros necesario para su realización.

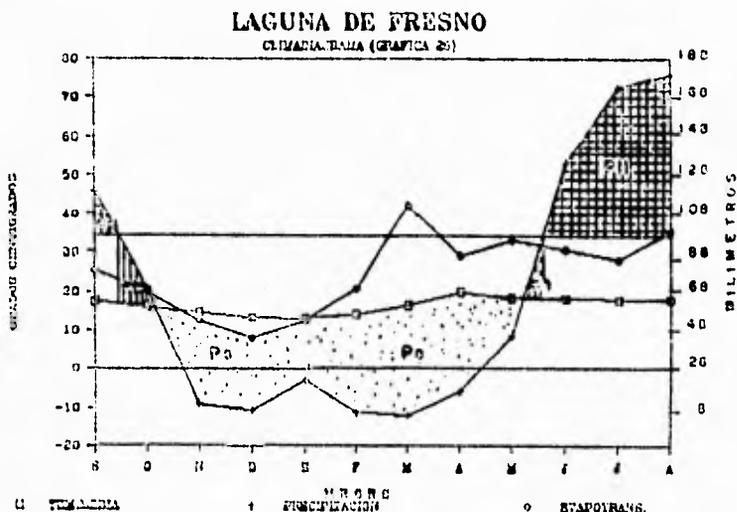


Figura 2.4 Climadiagrama de la Laguna del Fresno. Herrera 1991.

CAPITULO 3

PRACTICAS AGROMETEOROLOGICAS Y PRESENTACION DE LA INFORMACION ESTADISTICA.

3.1 Introducción

La importancia cada vez mayor del estudio del ambiente y de su manejo para mejorar la producción del suelo ha hecho de la aplicación de la meteorología y de la Climatología, ciencias indispensables en la formación de diversos profesionales a diferentes niveles de conocimiento científico.

Los datos climáticos registrados en las estaciones climatológicas generalmente son usados en la agricultura en forma de índices agroclimáticos. Estos índices son estimados a partir de los elementos primarios del clima. Sin embargo, hay algunos elementos del clima que se emplean directamente, tales como la radiación solar, el viento, la cantidad de lluvia, etc. En ambos casos se recomienda efectuar un análisis estadístico con el cual se puedan manejar estos elementos en términos de probabilidades de ocurrencia.

Los parámetros más comunmente determinados son la temperatura y la precipitación, y en algunas ocasiones la evaporación, sin embargo, éstos no son los únicos elementos del clima que intervienen en las fases fenológicas de los cultivos; al respecto la Organización Meteorológica Mundial (OMM), estableció una Guía para Prácticas Agrometeorológicas (1963), misma que fue corregida y aumentada en 1982, y ampliamente difundida.

En dicha guía, se pretende promover una estandarización de las observaciones meteorológicas que se utilizan para fines agropecuarios y forestales en el mundo, especificando el tipo de parámetro y la forma en que deben ser cuantificadas dentro de una estación y fuera de éstas; esto último, para obtener conjuntamente con la evaluación de los elementos climáticos, la información básica necesaria para explicar la relación del tiempo y el clima, con los variados aspectos de la agricultura y ganadería.

3.2 Importancia de las prácticas agrometeorológicas

Las predicciones meteorológicas, salvo excepciones muy particulares prestan un servicio efectivo muy limitado en agricultura, sobre todo en agricultura extensiva. Las predicciones de 24 o 49 horas de anticipación podrían ser de alguna utilidad, pero la forma en que son formulados no son tan precisos, lo que los hace menos aprovechables. Las predicciones a largo plazo (varios meses), podrían ser de más utilidad, ya que permitiría tomar con anticipación las precauciones necesarias para el mejor éxito de las actividades agropecuarias y forestales, pero está muy lejos el poder ser formulada adecuada y seriamente..

Se necesitan predicciones que cubran desde las características detalladas de las condiciones meteorológicas que han de producirse en un corto período de uno a tres días, y en ciertas épocas críticas hasta las predicciones estacionales de la evolución meteorológica. Incluso resultan útiles las indicaciones de la posible variabilidad climática en función de los registros climáticos históricos obtenidos a partir de los datos u otros antecedentes, especialmente en el caso de las estadísticas de probabilidad, con objeto de que los planes de desarrollo no pierdan su significación con motivo de un cambio notable del comportamiento del tiempo meteorológico.

Se facilitan considerables servicios a la agricultura mediante las predicciones agrometeorológicas, tales como las de las fechas de los acontecimientos fenológicos, la cantidad y calidad del rendimiento de los cultivos y la ocurrencia de epidemias entre los animales y las plantas. Estas predicciones se hacen utilizando las relaciones establecidas entre los efectos meteorológicos acumulativos en una fase temprana de desarrollo y el acontecimiento final que se espera que se produzca algún tiempo después de la fecha de difusión de la predicción. Este planteamiento de "predicción de los cultivos sin predicción meteorológica" es muy prometedor para la evaluación de los cultivos, con objeto de que las posibles anomalías de producción puedan ser identificadas y valoradas cuantitativamente lo antes posible.

En ciertas regiones, se producen excedentes temporales de determinados productos agrícolas, pero estas reservas se desvanecen rápidamente cuando en años sucesivos hay escases de cosecha. Incluso sin esta escasez, los excedentes hubieran desaparecido en breve tiempo debido al crecimiento de la población y de sus demandas, especialmente en los países en desarrollo. La planificación mundial a largo plazo de la producción alimentaria debe hacerse teniendo en cuenta los efectos que cada año ejerce la variabilidad climática, en el rendimiento de los cultivos.

Cualquiera que se a la manera en que se distribuyen sobre toda la tierra los acontecimientos meteorológicos, tanto favorables como desfavorables, para las actividades agropecuarias y forestales, a largo plazo habrá insuficiencia de suministros alimentarios adecuados para la población mundial si está sigue su actual incremento demográfico, a menos que:

- a) mejore extraordinariamente la tecnología agrícola;
- b) se utilicen con mayor eficacia los recursos naturales; y
- c) los organismos nacionales e internacionales responsables de la planificación y ordenación de los recursos alimentarios dispongan de información actualizada de las condiciones de los cultivos y de los posibles fallos de los mismos, como base de las decisiones que adopten.

3.3 Función de la Comisión de Meteorología Agrícola (CMAg)

Generalidades

La comisión de Meteorología Agrícola es una de las ocho Comisiones Técnicas de la Organización Meteorológica Mundial, que a su vez es un organismo especializado de las Naciones Unidas. Se puede hallar más información a este respecto en los Documentos Básicos de la OMM y en el actual Informe Anual de la Organización.

Atribuciones de la CMAg.

Las responsabilidades de la CMAg están claramente definidas en sus atribuciones especificadas por el Congreso de la OMM. Según dichas atribuciones, la Comisión está encargada de fomentar la meteorología agrícola, tanto en el campo científico como práctico, de facilitar los resultados de estas investigaciones a todos los científicos del mundo y a otros órganos integrantes, y de aplicar los conocimientos de todas las ramas de la meteorología a la agricultura, facilitando al mismo tiempo asesoramiento en esta materia y estableciendo un sistema de formación especializada del personal meteorológico, de modo que los conocimientos que actualmente se poseen en materia de meteorología puedan ser aplicados de manera práctica para fines agrícolas.

Más recientemente, la Comisión ha experimentado importantes cambios en su actividades, especialmente en lo que respecta a su función dentro de la producción alimentaria mundial. Aunque la Comisión tiene un excelente historial en lo que se refiere a las tareas de investigación y formación profesional en materia de meteorología agrícola,

se concede ahora mayor interés a las aplicaciones de los trabajos de investigación y a los servicios operativos destinados a la agricultura.

Este nuevo aspecto comenzó realmente en la quinta reunión de la Comisión, celebrada en 1971 en Ginebra, cuando se crearon varios grupos de trabajo y se nombraron a diferentes ponentes para facilitar los datos experimentales e información relativos a nuevos temas no estudiados por la Comisión hasta esa fecha. Los alarmantes sucesos originados por condiciones meteorológicas adversas, tales como la sequía de la región de Sahel y la escasez mundial de alimentos, han motivado que la Comisión participe activamente en la evaluación de los recursos climáticos disponibles para la producción de alimentos, especialmente en los países en desarrollo, así como en la evaluación actual del rendimiento de los cultivos a partir de los datos meteorológicos, en especial en los más importantes países productores de cereales.

3.4 Componentes de la Meteorología Agrícola

En la elaboración de los programas correspondientes a los servicios de investigación agrometeorológica y de formación profesional, es importante identificar la amplia gama de problemas con que se enfrenta la agricultura en relación con el tiempo y el clima. Estos componentes de la meteorología agrícola se estudian a continuación dentro de los doce títulos siguientes.

1. Control agrometeorológico (técnicas, concentración de datos, redes, experimentos)
2. Medio ambiente de las plantas y producción de cultivos (efecto de elementos meteorológicos en el desarrollo y crecimiento de las plantas, cantidad y calidad de las cosechas, necesidades climáticas de los cultivos, evaluación operativa de las condiciones de los cultivos).
3. Efectos nocivos en las plantas y pérdidas de los cultivos (plagas y enfermedades, contaminación, efectos de las condiciones meteorológicas peligrosas en los cultivos, resistencia de los vegetales al frío, daños producidos por las heladas y la congelación).
4. Salud del ganado y producción pecuaria (problemas ambientales relacionados con el alojamiento, salud y producción del ganado).
5. Enfermedades y parásitos de los animales (efectos directos e indirectos de las condiciones meteorológicas en los distintos tipos de enfermedades animales, daños y muertes; pérdidas económicas; predicción de la incidencia e intensidad de las enfermedades de los animales).

6. Recursos climáticos (encuestas climatológicas, evaluación del ecosistema, estudio del aprovechamiento de las tierras, estudio de condiciones climáticas análogas, variabilidad climática, estadísticas climatológicas y datos elaborados, análisis de los recursos agroclimáticos)

7. Recursos del suelo (clasificación del suelo, deterioro y erosión del suelo, pérdida de tierras agrícolas debido a la urbanización, fijación de dunas de arena)

8. Recursos hídricos (necesidades de agua para la agricultura, eficaz uso del agua para los cultivos, necesidades de riego y programación de los excedentes de agua y drenaje, sequías agrícolas)

9. Actividades de dirección (análisis del tiempo y el clima en relación con el calendario de trabajo sobre el terreno; condiciones para la recolección de plantas forrajeras, secado de la paja, control de las plagas y enfermedades, predicciones meteorológicas necesarias para la agricultura)

10. Modificación artificial de los regímenes meteorológicos e hidrológicos (protección contra las condiciones meteorológicas adversas, clima controlado, modificación artificial del tiempo)

11. Meteorología forestal. La correcta aplicación de la información meteorológica puede aportar un beneficio considerable a la protección y conservación de los recursos forestales.

12. Valor económico de la información y asesoramiento agrometeorológico (servicios utilizados en la planificación agrícola (tiempo pasado) y operaciones agrícolas (tiempo presente y tiempo previsto))

Formación Profesional en materia de Meteorología Agrícola.

Una de las responsabilidades de la OMM es fomentar la formación profesional en materia de meteorología y ayudar a resolver los problemas de coordinación que se plantean como consecuencia de la formación del personal meteorológico de todas las categorías. La Comisión de Meteorología Agrícola revisa continuamente las necesidades inherentes a la formación profesional en materia de meteorología agrícola y recomienda determinadas mejoras, tales como la creación de un mayor número de programas universitarios, las visitas de conferencistas especializados, la organización de seminarios de formación con carácter de cursillos prácticos y los programas itinerantes de formación profesional para instruir a los técnicos agrometeorológicos.

Clasificación del Personal Meteorológico.

La siguiente clasificación del personal meteorológico ha sido adoptada por la OMM y se especifica con detalle en las Directrices para la enseñanza y formación profesional del personal meteorológico (OMM-N°258):

Clase I.

Se trata de personal universitario con adecuada formación en matemáticas y física que han terminado con éxito un curso de meteorología del nivel especificado en el correspondiente programa. En este grupo pueden existir varios niveles o grados de calificación.

Clase II.

Este personal ha terminado su enseñanza secundaria o equivalente y ha seguido cursos de matemáticas y física con el nivel especificado en el programa de estudio, y también ha terminado con éxito un curso de meteorología. La formación recibida debe haber sido impartida en una universidad, u otra institución adecuada, con profesores pertenecientes a la Clase I.

Clase III.

Este personal ha recibido enseñanza secundaria completa o enseñanza equivalente, así como formación en meteorología, insistiendo en la utilización de datos de observación, o bien han seguido formación de carácter técnico y práctico, insistiendo en la utilización de instrumentos de observación.

Clase IV.

Este personal debe poseer suficiente información en meteorología para que les permita observar con precisión y objetividad los fenómenos meteorológicos y comprender la trascendencia que implican sus tareas habituales.

3.5 Colaboración entre la Meteorología y la Agricultura

Los objetivos de la meteorología agrícola sólo se pueden lograr plenamente si existe estrecha colaboración entre los intereses agrícolas y meteorológicos.

Cooperación entre los Meteorólogos y Agrónomos.

Servicios prestados por los Meteorólogos a los Agrónomos.

Los servicios que los meteorólogos pueden facilitar a los agrónomos pueden ser agrupados con carácter general en las siguientes categorías:

- a) cooperar con los servicios agrícolas y solicitar su asesoramiento en todas las cuestiones de interés común;
- b) facilitar, en la mayor medida posible, cualquier dato meteorológico disponible que soliciten los agrónomos para sus trabajos de investigación, o tareas experimentales y de asesoramiento;
- c) asesorar con respecto a la mejor utilización de los datos meteorológicos y climáticos, con el fin de lograr objetivos tales como el mejoramiento de la producción agrícola, la introducción de nuevas especies de plantas y animales y el incremento de la zona agrícola que puede utilizarse con eficacia;
- d) ayudar a los intereses agrícolas y otros intereses conexos a combatir las condiciones meteorológicas y climáticas desfavorables;
- e) ayudar en la lucha contra las plagas y enfermedades agrícolas, teniendo en cuenta tanto los factores ambientales que se producen durante su ocurrencia como las medidas de protección adoptadas;
- f) asesorar la protección de los productos agrícolas durante los períodos de almacenamiento y tránsito, contra los daños causados por los factores meteorológicos.

Servicios prestados por los Agrónomos a los Meteorólogos.

Los servicios que los agrónomos pueden facilitar a los meteorólogos pueden ser agrupados en general en las siguientes categorías:

- a) cooperar con los servicios meteorológicos y solicitar su asesoramiento con respecto a todos los temas de interés común;
- b) facilitar a los meteorólogos todos los datos ecológicos y antecedentes del ciclo biológico de las plantas y animales, así como de las correspondientes plagas y enfermedades que puedan servir de guía para preparar las correspondientes predicciones meteorológicas y para formular el debido asesoramiento climatológico con respecto a temas como la introducción de nuevas plantas y animales;

- c) fomentar la realización de encuestas nacionales continuas y completas con respecto a las plagas y enfermedades agrícolas más importantes, de modo que puedan ulteriormente estudiar sus relaciones con los factores meteorológicos predominantes en diferentes regiones;
- d) facilitar, en la medida de lo posible, datos estadísticos sobre el rendimiento de los cultivos, etc., que sean adecuados para investigar y determinar relaciones seguras entre los cultivos y las condiciones meteorológicas;
- e) cooperar con los servicios meteorológicos en la creación de estaciones agrometeorológicas normalizadas y en la concentración de otros datos de interés.

Servicios conjuntos de los Meteorólogos y Agrónomos.

Los meteorólogos y los agrónomos deben cooperar para lograr que la información meteorológica y climatológica constituya un "medio operativo" para todos los agricultores en sus actividades diarias y en su planificación semanal, estacional y a largo plazo. Sus servicios conjuntamente establecidos y dotados deben incluir:

- a) predicciones operativamente útiles de las variables meteorológicas de mayor transcendencia para las operaciones agrícolas corrientes, junto con una interpretación agrícola de dichas predicciones;
- b) programas educativos para los agricultores, con objeto de demostrar la utilidad que la formación meteorológica tiene para la planificación agrícola y sus actividades prácticas;
- c) proyectos conjuntos de investigación para estudiar las relaciones que existen entre la agricultura y las condiciones meteorológicas y sus aplicaciones a la práctica agrícola.

La continuación de dicha cooperación durante un amplio período de años originaría la aparición de personal experimentado que pudiéramos denominar "expertos conjuntos" en materia de meteorología agrícola, situación muy deseable desde todos los puntos de vista.

3.6 Presentación de la información estadística de acuerdo a la CNAG

Si bien las predicciones meteorológicas, actualmente, ayudan muy poco a luchar contra las adversidades atmosféricas que dañan a la agricultura, a la ganadería y a los bosques, el cálculo de las probabilidades de que ocurran, en un lugar, eventos desfavorables para un cultivo,

ofrece soluciones más firmes, a ser aconsejadas por los diversos técnicos agropecuarios y forestales.

El tipo de información climatológica que se necesita varía en función de la clase de cultivo, su sensibilidad al medio ambiente, necesidades de energía y agua, etc. Ciertas estadísticas pueden ser importantes, como las siguientes: series de días consecutivos en los que las temperaturas máximas y mínimas o las cantidades de precipitación exceden o son inferiores a determinados valores umbrales críticos; fechas medias y fechas extremas en que se alcanzan estos valores umbrales.

A continuación se citan los tipos más frecuentes de información que puede deducirse de los datos básicos:

Temperatura del Aire.

- I) Probabilidades de la Temperatura;
- II) Horas más frías;
- III) Grado días;
- IV) Horas del día por encima o por debajo de determinadas temperaturas;
- V) Variabilidad de un día a otro;
- VI) Estadísticas de la temperatura máxima y mínima;
- VII) Estadísticas de la estación de crecimiento;
- VIII) Riesgo de heladas;

Aplicaciones.

1. Para calcular unidades térmicas de crecimiento o también llamadas unidades calor, mediante las cuales es posible predecir etapas fenológicas en los cultivos y etapas biológicas en los insectos.
2. Los registros de temperatura también se usan para calcular las unidades frío requeridas por las especies frutales de tipo caducifolio y por algunos insectos durante la etapa de dormancia.
3. En las regiones con clima templado la temperatura mínima (generalmente 0°C) es usada para estimar la estación de crecimiento (estación libre de heladas) para los cultivos.
4. Tanto las temperaturas altas como las oscilaciones térmicas diarias afectan el desarrollo y producción de cultivos. A través del cálculo de probabilidades arriba de ciertos límites establecidos, se puede tener una estimación del efecto a cultivos susceptibles, ya sea de altas temperatura u oscilaciones térmicas diarias.

5. Para estimar el rango térmico de adaptación de animales y el nivel de productividad, el cual es afectado directamente por la temperatura.

Precipitación.

- I) Probabilidad o cantidad especificada durante cierto período;
- II) Número de días con cantidades específicas de precipitación;
- III) Probabilidades de que se produzcan chubascos tormentosos; granizo;
- IV) Duración y cantidad de capa de nieve;
- V) Fecha del comienzo y el final de la capa de nieve;
- VI) Probabilidad de que se produzcan cantidades extremas de precipitación;

Aplicaciones.

Lluvia.

1. El cálculo de probabilidades de lluvia tiene diferentes aplicaciones, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

- a) Estimación de fechas de siembra, basadas en una cantidad mínima de lluvia que asegure la germinación y establecimiento del cultivo.
- b) Cálculo de la Cantidad mínima de lluvia que podría recibirse durante la etapa de desarrollo más crítica de un cultivo (etapa reproductiva).
- c) Para estimar la mejor fecha de cosecha de un cultivo en zonas lluviosas.
- d) Para estimar el éxito de una práctica de producción (dosis de fertilizante, tipo de labranza, etc.) basado en el cálculo de probabilidades de lluvia.

2. Estudio de la relación entre la cantidad de lluvia y producción, con fines de predecir el rendimiento con anticipación a la cosecha. Este tipo de estudios es recomendable llevarlos a cabo sobre todo en aquellas regiones donde la cantidad de lluvia sea el factor limitante más importante de la producción.

3. Para calcular índices de sequía y/o exceso de humedad ya sea en forma individual o bien, en combinación con factores de suelo y planta.

Granizo.

1. El daño mecánico que causa el granizo es especialmente importante durante la etapa reproductiva de los cultivos.
2. El conocimiento de la ocurrencia frecuente de las granizadas en determinado lugar permite seleccionar los sitios en el establecimiento de algunos cultivos.

Viento

- I) Rosa de vientos;
- II) Viento máximo;
- III) Valor medio de la velocidad del viento;
- IV) Variación diurna;
- V) Horas con viento inferior a determinada velocidad.

Aplicaciones.

1. Componente esencial para determinar evapotranspiración en cultivos localizados en zonas áridas y semiáridas.
2. Es importante su efecto sobre erosión del suelo y daño mecánico a los cultivos.
3. A través de la dirección del viento es posible estudiarlas trayectorias de insectos y elementos o sustancias patógenas.
4. El viento es importante también en la polinización de plantas, diseminación de semillas, regulador de CO₂ en la capa de aire cercana al suelo, y como agente benéfico reduciendo el daño por heladas, al mezclar las capas de aire cercanas al suelo.
5. La información de dirección y velocidad del viento es utilizada en la programación de aplicaciones aéreas de pesticidas.

Capa de nubes, insolación, radiación solar:

- I) Posible porcentaje de insolación;
- II) Número de días despejados;
- III) Número de días medio nublados;
- IV) Número de días nublados;
- V) Cantidades de radiación global y neta;

Aplicaciones.

1. Para estimar la tasa de acumulación de materia seca la cual es proporcional a la cantidad de radiación interceptada por un cultivo, y con base en ello, ubicar los cultivos de acuerdo a sus requerimientos de radiación solar (cultivos con patrón de fotosíntesis tipo C3 vs. tipo C4)•
2. Para estimar la evapotranspiración potencial a través del uso de fórmulas empíricas (ejem: Penman, Jensen-Haise).
3. Para estimar el balance de energía entre planta y animales.

Humedad Ambiental.

- I) Probabilidad de que se produzca determinada humedad relativa;
- II) Duración, en función del tiempo, de determinados umbrales de humedad;

Aplicaciones.

1. La cantidad de vapor de agua en el ambiente generalmente se emplea en investigación como un porcentaje respecto a un ambiente saturado, es decir, como humedad relativa.
2. En estudios sobre la interrelación entre planta-patógeno-medio ambiente, usándose en combinación con datos de temperatura.
3. Es un factor ambiental a considerar en el cálculo de la evapotranspiración potencial a través de fórmulas empíricas desarrolladas para esto.

Evaporación en la superficie libre de agua:

- I) Cantidad total;
- II) Variación diurna de la evaporación;
- III) Sequedad relativa de la evaporación;
- IV) Evapotranspiración;

Aplicaciones.

1. Para estimar la evapotranspiración potencial de cultivos haciendo los ajustes correspondientes, de acuerdo con la localización del tanque evaporímetro.
2. Para estimar la evapotranspiración real en los cultivos, haciendo uso además, de datos del suelo y de la planta.

Aplicaciones.

1. Para estimar la tasa de acumulación de materia seca la cual es proporcional a la cantidad de radiación interceptada por un cultivo, y con base en ello, ubicar los cultivos de acuerdo a sus requerimientos de radiación solar (cultivos con patrón de fotosíntesis tipo C3 vs. tipo C4)†
2. Para estimar la evapotranspiración potencial a través del uso de fórmulas empíricas (ejem: Penman, Jensen-Haise).
3. Para estimar el balance de energía entre planta y animales.

Humedad Ambiental.

- I) Probabilidad de que se produzca determinada humedad relativa;
- II) Duración, en función del tiempo, de determinados umbrales de humedad;

Aplicaciones.

1. La cantidad de vapor de agua en el ambiente generalmente se emplea en investigación como un porcentaje respecto a un ambiente saturado, es decir, como humedad relativa.
2. En estudios sobre la interrelación entre planta-patógeno-medio ambiente, usándose en combinación con datos de temperatura.
3. Es un factor ambiental a considerar en el cálculo de la evapotranspiración potencial a través de fórmulas empíricas desarrolladas para esto.

Evaporación en la superficie libre de agua:

- I) Cantidad total;
- II) Variación diurna de la evaporación;
- III) Sequedad relativa de la evaporación;
- IV) Evapotranspiración;

Aplicaciones.

1. Para estimar la evapotranspiración potencial de cultivos haciendo los ajustes correspondientes, de acuerdo con la localización del tanque evaporímetro.
2. Para estimar la evapotranspiración real en los cultivos, haciendo uso además, de datos del suelo y de la planta.

Rocío:

- I) Duración y cantidad de rocío;
- II) Variación diurna del rocío;
- III) Asociación del rocío con la vegetación húmeda;
- IV) Probabilidad de formación del rocío con la estación del año;

Aplicaciones.

1. La presencia, pero sobre todo la duración del rocío sobre las plantas es un factor importante para el desarrollo de patógenos.
2. La cantidad de rocío depositado sobre el suelo y la cobertura vegetal, llega a ser una cantidad de humedad apreciable para los cultivos en regiones con poca precipitación.

Temperatura del suelo:

- I) Desviación media y desviación típica a una profundidad normalizada;
- II) Profundidad de penetración de las heladas;
- III) Probabilidad de ocurrencia de determinadas temperaturas a profundidades normalizadas;
- IV) Fechas en que se alcanzan determinados valores umbrales de temperatura (germinación, vegetación);

Aplicaciones.

1. La temperatura del suelo juega un papel importante en procesos fisiológicos de las plantas, tales como la germinación de la semilla, la absorción de agua y nutrimentos, el crecimiento y desarrollo de raíces, etc...
2. La temperatura del suelo se emplea también para estimar los diferentes estadios de desarrollo de insectos que invernan en el suelo.
3. Es importante en la descomposición de materia orgánica a través de flora microbiana, etc...

Información Prevista.

La información meteorológica operativa se define como datos en tiempo real que indican las condiciones del tiempo pasado (en los últimos días), del tiempo presente y también del tiempo previsto. No obstante, todos sabemos que las previsiones conforme transcurre el tiempo son menos exactas, de modo que cuando más largo sea el periodo previsto menos segura resulta la predicción.

3.7 Análisis estadístico de los datos Agrometeorológicos

Función de los Análisis Estadísticos.

Los análisis estadísticos desempeñan una importante función en agrometeorología, ya que constituyen un medio de interrelacionar series de datos procedentes de fuentes diversas, tales como los datos biológicos, los relativos al suelo y a los cultivos y las medidas atmosféricas de índole física. Debido a la complejidad y multiplicidad de los efectos que ejercen los factores ambientales en el crecimiento y desarrollo de los seres vivos y, en la producción agrícola, algunas veces resulta necesario utilizar métodos estadísticos bastantes complicados para detectar las acciones mutuas que se ejercen entre dichos factores y sus consecuencias prácticas.

No se debe olvidar que el asesoramiento referente a la planificación agrícola a largo plazo, a la elección del proyecto agrícola, a la adquisición del equipo más idóneo y a la introducción de medidas de protección contra las condiciones meteorológicas extremas depende, en cierta medida, de la calidad del análisis climatológico que se haga así como de datos biológicos que muchas veces son de difícil cuantificación.

Escalas Climáticas.

En agricultura, quizás más que en la mayoría de las actividades económicas, es preciso considerar todas las escalas del clima:

a) Con objeto de satisfacer las necesidades nacionales y regionales, resultan muy útiles los estudios a escala macroclimática, que pueden fundarse principalmente en los datos procedentes de las estaciones sinópticas. En lo que respecta a ciertos parámetros atmosféricos que experimentan poca variación espacial, como por ejemplo la duración de la insolación durante un período de diez días, dichos análisis han demostrado ser satisfactorios.

b) Sin embargo, con objeto de planificar las actividades de una empresa agrícola o de un grupo de empresas, resulta esencial referirse a la escala mesoclimática o escala topoclimática, es decir, hay que tener en cuenta las características geomorfológicas locales y utilizar los datos procedentes de una red de observación de retículo más fino. Estas series climatológicas complementarias de datos pueden corresponder a periodos más cortos que los utilizados en el análisis macroclimático, siempre que puedan ser relacionados con algunas series de referencia.

c) Para la investigación bioclimática se debe estudiar el ambiente a nivel de las plantas o de los animales e incluso al de la misma colonia patógena. La obtención de información sobre energía radiante, sobre la humedad o sobre los intercambios químicos implica la utilización de medidas de la más fina escala de la microclimatología.

Períodos de Referencia.

La longitud de los períodos de referencia para los que se definen los datos estadísticos deben ser elegidos en función de las necesidades de cada actividad agrícola. Los períodos de un mes o de un año, en general, no resultan adecuados y es mejor utilizar una escala de tiempo reducida o bien combinar varios meses, de modo que muestren el desarrollo general de determinada actividad agrícola. Se sugieren pues los siguientes períodos para fines de referencia:

a) períodos de diez días o de una semana para los análisis estadísticos operativos, es decir, la evapotranspiración, balance de agua, sumas de temperatura, frecuencia de las ocasiones en que un valor excede o no alcanza un valor umbral crítico, etc. No obstante, los datos correspondientes al período de una semana, que además tiene la ventaja de haber sido adoptado por un gran número de investigadores en el mundo para la mayoría de las actividades, son difíciles de ajustar a años sucesivos;

b) para ciertas actividades agrícolas, los períodos deben corresponder al estado fenológico o a los períodos en que se realizan determinadas operaciones de cultivo. Así pues, el balance hídrico, las sumas de temperatura, las series de días con precipitación o temperatura inferior a determinado valor umbral, etc., podrían ser analizados con referencia a:

- I) la estación de crecimiento media;
- II) los períodos que corresponden a determinadas fases fenológicas críticas;
- III) los períodos durante los cuales es necesario llevar a cabo operaciones de cultivo, tratamiento de protección de las plantas o adoptar medidas de prevención.

Desde luego, estas sugerencias implican un perfecto conocimiento del calendario normal de actividades agrícolas de la zona.

Principio de los Periodos de Referencia.

En Meteorología agrícola lo mejor es elegir puntos de partida que correspondan al ritmo biológico, ya que los periodos arbitrarios del año civil (año, mes) no coinciden con ellos. Por ejemplo, en las zonas templadas el punto de partida podría ser el otoño (periodo de siembra de los cereales de invierno), o la primavera (reanudación del crecimiento). En zonas sometidas a los monzones o al movimiento estacional de la zona de convergencia intertropical, se podría elegir el principio de la estación de lluvias. También podría tomarse en cuenta en la evolución de un factor climático significativo que se considerase representativo de un ciclo biológico difícil de determinar directamente, por ejemplo, la suma de temperaturas que exceda del umbral de temperatura necesario para el crecimiento.

Análisis de los Efectos del Tiempo Meteorológico.

Los elementos climáticos actúan independientemente de los ciclos biológicos de los seres vivos, por lo que el estudio analítico de sus efectos separados resulta con frecuencia ilusorio. El considerar todos éstos ciclos simultáneamente, exige sin embargo, un número muy grande de datos y un complejo tratamiento estadístico. En muchos casos, es mejor tratar de combinar factores en un sólo índice agroclimático, considerado como un parámetro complejo, el cual puede ser comparado con mayor facilidad con los datos biológicos.

3.8 Métodos Estadísticos

Verificación de las Series.

Antes de elegir una serie de valores para someterlos a tratamiento estadístico, esta debe ser cuidadosamente examinada para determinar su validez. A las series de datos agroclimáticos se les debe aplicar verificaciones. En especial, se debe verificar la homogeneidad y, si es necesario, deben rellenarse las lagunas que en ella existan. Se supone de antemano que los valores individuales tendrán que ser cuidadosamente verificados (consecuencia y coherencia), de conformidad con lo especificado.

Distribución de Frecuencia.

Las distribuciones de frecuencia son de especial interés en agricultura debido a la existencia de umbrales ecológicos que, cuando son alcanzados, pueden dar como

resultado un rendimiento limitado de la cosecha (umbral de crecimiento), o bien reacciones irreversibles dentro de los tejidos vivos (umbrales de sensibilidad). Las frecuencias acumulativas son muy adecuadas y convenientes para fines prácticos ya que pueden ser aplicadas directamente por el agrónomo. Se recomienda la elaboración de tablas que indiquen las frecuencias medias de las ocasiones en que se exceden los valores de determinados parámetros (o cuando estos valores son inferiores a dichos parámetros), dando valores umbrales durante determinado período, como por ejemplo:

a) valores umbrales de las temperaturas máximas y mínimas diarias, que puedan ser utilizadas para estimar el riesgo de que se produzca excesivo calor o heladas y la duración de este riego;

b) valores umbrales del déficit de agua de diez días, teniendo en cuenta las reservas del suelo. Con éstos datos se puede estimar la cantidad de agua requerida para el riego;

c) valores umbrales de las humedades relativas a partir de observaciones horarias o cada tres horas. Si se dispone de una serie de observaciones suficientemente largas (de 10 a 20 años), se puede suponer que es representativa de la población total y así se puede deducir las duraciones medias de los períodos en que los valores exceden (o están por debajo) de los umbrales especificados. Este procedimiento puede ser útil para resolver los problemas relacionados con la desecación, ventilación, etc. Cuando se calculen estas frecuencias medias, resulta algunas veces ventajoso extraer información referente a los valores extremos observados durante el período elegido (estación de crecimiento, período de especial sensibilidad, etc.).

Media.

Se pueden utilizar los valores medios de los principales elementos climáticos (de diez días, mensuales o estacionales) para comparar a grandes rasgos diferentes regiones climáticas. Con objeto de demostrar como se distribuyen los elementos climáticos, estos valores medios deben ser complementados por parámetros de dispersión adecuados, tal como la desviación típica, el coeficiente de variación (variabilidad), los quintiles y los valores extremos. En agroclimatología, algunas veces es preciso comparar series de observaciones que no han sido hechas simultáneamente. En éstos casos, para obtener medias comparables, se aplican ajustes a las series con objeto de rellenar cualquier laguna que en ellas exista.

Distribución de las series de días consecutivos.

La distribución de secuencias de los días consecutivos en los que ocurre determinado acontecimiento climático resulta de especial interés para el agrónomo. A partir de estos datos se puede deducir, por ejemplo, la probabilidad de poder realizar las operaciones agrícolas que requieren condiciones meteorológicas específicas y que duren varios días (aventar el follaje, recolectar la uva, etc.) Análogamente, la elección de las medidas de protección que hay que tomar contra las heladas o las sequías pueden fundarse en un estudio de la ocurrencia de estos fenómenos y de la distribución de las correspondientes secuencias. Cualquiera que sea la finalidad para la que se usen las secuencias es importante especificar claramente los períodos a los que se refieren (y también si se trata o no de períodos coincidentes).

Métodos de Correlación.

Los métodos de correlación se utilizan para descubrir, objetiva y cuantitativamente, la relación que puede existir entre varias variables. Este procedimiento es muy útil en agrometeorología debido al gran número de factores que pueden intervenir simultáneamente o sucesivamente durante el desarrollo de un cultivo y también porque, con respecto a muchos de ellos (factores climáticos en particular) es imposible realizar experimentos precisos, ya que la ocurrencia no puede utilizar el método de correlación:

a) para completar series climatológicas que tengan lagunas. La comparación de los datos correspondientes a diferentes elementos atmosféricos (por ejemplo, precipitación, evapotranspiración, duración de la insolación) permite estimar los datos que faltan deduciéndolos de otros elementos medidos;

b) para comparar los datos climatológicos con los biológicos o agronómicos, como por ejemplo, rendimiento de las cosechas, calidad de cultivos (contenido de azúcar, peso de materia seca, etc.). Se debe tener cuidado al interpretar estas correlaciones y además los resultados deben ser sometidos a rigurosas pruebas significativas antes de difundirlos. Para elegir las estaciones de referencia resulta de gran utilidad comparar los coeficientes de correlación obtenidos de las observaciones hechas en el lugar en que se estudia con los correspondientes a las estaciones vecinas durante los mismos períodos.

El descubrimiento de un coeficiente de correlación significativo debe alentar al agrometeorólogo en la mayoría

de los casos para tratar de hallar una explicación física o biológica de dicha relación, y no debe sentirse satisfecho solamente con el resultado estadístico.

Regresiones simples y múltiples.

Los métodos de análisis con variables múltiples permiten determinar la importancia relativa de determinados elementos climáticos en el desarrollo de plantas y animales, teniendo en cuenta las diferencias que existen entre estaciones sucesivas. Así pues, se pueden utilizar formas analíticas sencillas (expresiones polinómicas) para describir la evolución de un elemento climático durante un año civil, o durante un ciclo de crecimiento, facilitando la búsqueda de determinadas regresiones.

Sin embargo, nos llevaría al error de tratar de hacer conclusiones operativas de series muy cortas; también hay que asegurarse de que los datos utilizados con este método son homogéneos. No es preciso decir que los resultados deben ser sometidos a pruebas muy estrictas de significación, teniendo presente que cualquier interpretación de los resultados estadísticos ha de fundarse necesariamente en métodos bien establecidos.

Distribución de los valores Extremos.

Ciertos cultivos pueden quedar expuestos a condiciones letales (heladas, excesivo calor, sequías, etc.) incluso en las zonas donde habitualmente se desarrollan. Por consiguiente, es muy conveniente estimar la frecuencia de los años en que dichos valores excesivos pueden producirse. El análisis de la distribución de los valores extremos (tal como la distribución de GUMBEL) puede aportar información de gran utilidad.

Periodicidades Climáticas.

El agrónomo, mucho más que cualquier otro usuario de los datos climáticos, puede caer en la tentación de buscar periodicidades climáticas que le puedan servir de base para la dirección de la producción agrícola. Debe observarse que en la Guía de prácticas climatológicas, se insiste en el cuidado que se debe tener con respecto a dichas periodicidades y, además, que aunque dichas periodicidades puedan ocasionalmente tener un interés teórico se ha llegado a la conclusión de que no son seguras, ya que tienen amplitudes que resultan demasiado pequeñas para poder establecer alguna conclusión práctica.

3.9 Publicaciones de los resultados

Métodos Generales.

Para que los análisis estadísticos tengan utilidad práctica, han de ser distribuidos a los usuarios en una forma de fácil comprensión que no requieran un conocimiento estadístico superior. En cada publicación deben darse todos los detalles pertinentes para evitar cualquier ambigüedad en la interpretación en lo que respecta a las tablas o gráficos numéricos.

Tablas.

En las tablas numéricas de frecuencias, promedios, parámetros de distribución, periodos de retorno de las ocurrencias, etc., se debe especificar claramente lo siguiente:

- a) el emplazamiento geográfico (incluida la altitud del lugar de observación);
- b) el período en el que se funda el análisis estadístico (absolutamente necesario para estimar si los datos son representativos);
- c) el número de datos (para poder valorar la continuidad de las series);
- d) las unidades;
- e) la significación de todos los símbolos;

En cuanto a las tablas de frecuencia, es mejor indicar las frecuencias relativas (porcentaje), con objeto de facilitar la comparación de las poblaciones formadas por distintos números de observaciones. En este caso se ha de aclarar muy bien si los porcentajes se refieren al total de la población o a las clases separadas de la misma.

Tablas de Contingencia.

Con frecuencia, es necesario disponer de estimaciones de la ocurrencia simultánea de determinados valores de ciertos elementos o acontecimientos. Las tablas de contingencia resultantes deben ser lo más sencillas posible.

Gráficos.

Los gráficos se utilizan para indicar de manera concisa la información contenida en las tablas numéricas. Son útiles como complemento de las mismas, y facilitan la comparación de resultados. Las curvas de frecuencia acumulativa, los histogramas y climogramas dan una imagen general más exacta que la multiplicidad de datos numéricos obtenidos por el análisis estadístico. Se deben especificar a las que se pretenda dar una amplia distribución entre los usuarios agrícolas no deben contener escalas complicadas (por ejemplo, logarítmicas, de Gauss, etc.) que puedan resultar poco conocidas por los usuarios y que podrían conducirse a graves errores de interpretación de los datos. Además, debe evitarse incluir demasiada información en el mismo gráfico, así como la utilización de complicados símbolos convencionales.

Mapas.

Para exponer de manera concisa los resultados de los estudios agroclimáticos referentes a una zona, resulta muy conveniente trazar las isoyetas a partir de los datos transcritos en puntos específicos. Esto facilita la interpolación entre los distintos emplazamientos que se estudian. Muchos parámetros climáticos útiles para la agricultura pueden ser expuestos de este modo, como por ejemplo los siguientes:

- a) valores medios de los elementos climáticos (temperatura, precipitación, evapotranspiración, balance hídrico, balance de radiación, etc.);
- b) frecuencias: número de días consecutivos sin helada, sin deshielo, sin lluvia, etc.; períodos de retorno de los fenómenos atmosféricos;
- c) parámetros de dispersión: desviaciones típicas, coeficientes de variación;
- d) índices agroclimáticos.

Según sea la escala adoptada, este tipo de gráfico complementario se puede trazar más o menos teniendo en cuenta los factores geomorfológicos. Sin embargo, los usuarios de los gráficos deben ser informados del carácter general que estos tienen, con objeto de que puedan interpretarlos debidamente y han de saber también las correcciones que hay que aplicar para adaptarlos a las condiciones locales. Esto es muy importante en las regiones donde el relieve es accidentado.

CAPITULO 4

LA RADIACION SOLAR EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA VEGETACION.

4.1 Introducción

La energía que emite el sol, o radiación solar, recibida en la superficie terrestre, es la fuente de los fenómenos meteorológicos y de sus variaciones en el curso del día y del año.

Todos los cuerpos emiten energía radiante en forma de ondas electromagnéticas cuando tienen una temperatura sobre los cero grados absolutos. La fuente de esta radiación es el incesante movimiento molecular, la colisión es el resultado de las interacciones entre las moléculas y es convertida en energía cinética o potencial, elevando la temperatura de los cuerpos. La emisión y absorción de la radiación térmica está gobernada por la temperatura y la naturaleza de la sustancia emisora absorbente.

La radiación solar es la fuente de energía para los procesos biológicos que ocurren en la naturaleza. A éstos pertenecen fundamentalmente la actividad vital de las plantas, los animales y el ser humano.

El crecimiento y desarrollo de las plantas, y de los cultivos agrícolas, es un proceso de asimilación y transformación de la energía solar, por este motivo la producción agrícola es posible solamente bajo determinado mínimo de energía solar sobre la superficie terrestre.

4.2 Conceptos

La radiación solar es la energía del sol en el espacio, transmitida por medio de ondas electromagnéticas. La longitud de las ondas se mide en micras (μ), teniendo en cuenta que 1μ es igual a $1/1000$ milímetros (mm), o también en nanómetros (nm), teniendo en cuenta que 1 nm es igual a $1/1000 \mu$.

Todos los cuerpos que tienen una temperatura mayor que cero grados Kelvin (0°K), que corresponde a 273°C bajo cero (-273°C), emiten radiación. Cuanto mayor sea la temperatura del cuerpo radiante tanto más alta es la energía irradiada

por este. La longitud o longitudes de onda de esta radiación dependen de la temperatura del cuerpo radiante, y se manifiesta como rayos equis (X), rayos gama (γ), luz o calor.

La radiación solar es una emisión de ondas cortas, con longitudes de onda que fluctúan entre 0.2μ y 3μ , las cuales constituyen el 99% de la energía irradiada. Las ondas de longitud mayor que 3μ se consideran convencionalmente como ondas largas. Estas son el resultado de modificaciones experimentadas por la radiación original de onda corta al atravesar diferentes medios. Esta onda corta penetra en el suelo donde cambia sus características cualitativas y calienta su superficie.

Debido a que esta temperatura (0.2μ y 3μ) es comparativamente baja, la radiación de la tierra es de onda larga, ya que tiene más de 3μ de longitud, con intensidades máximas alrededor de 10μ (figura No. 4.1).

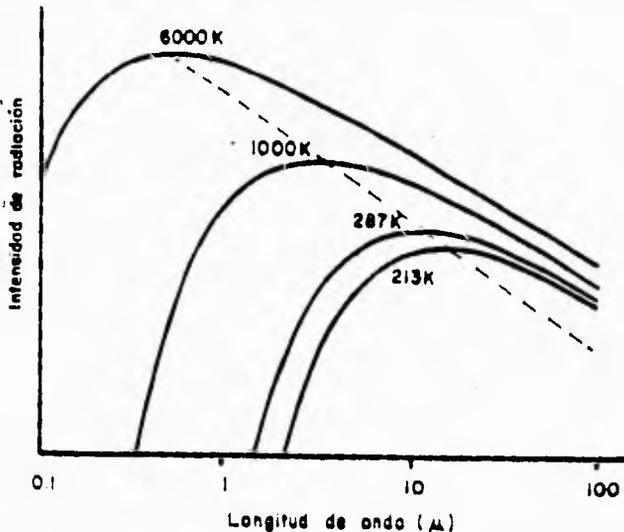


Figura 4.1. Distribución espectral de la medición de un Cuerpo Negro con una Temperatura superficial de 6000°K (sol), 1000° , (fuego), 287°K y 213°K (tierra caliente y fría respectivamente). Línea de trazos representa las longitudes de onda máxima intensidad calculados por la ley de Wien (Fritschen y Lloyd, 1979).

La longitud de onda, denominada con la letra del alfabeto griego "Lambda" (λ), generada por la mayor intensidad de radiación, se calcula según la ley de Wien, así:

(Longitud de onda máxima)

$$\lambda_{\max} = \frac{2880}{\text{Temperatura absoluta (}^{\circ}\text{K)}}$$

Por ejemplo, el sol presenta una temperatura superficial de 6000°C , por lo cual su intensidad máxima de radiación tiene, según la mencionada ley, una longitud de onda de :

$$\lambda_{\max} = \frac{2880}{6000} = 0.48 \mu$$

La intensidad de la radiación en general se mide en vatios por metro cuadrado (W m^{-2}) y también en calorías por centímetro cuadrado y minuto ($\text{cal cm}^{-2}\text{min}^{-1}$), aún en uso pero oficialmente sustituida por la primera. Otra unidad en uso es el Langley (ly), en donde:

$$1 \text{ ly min}^{-1} = 1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} = 698 \text{ W m}^{-2}$$

La radiación solar es prácticamente la única fuente de energía para todos los procesos físicos y biológicos que tienen lugar en la superficie terrestre. La cantidad de radiación que alcanza la tierra en el límite superior de la atmósfera es de:

$$1.94 \text{ ly min}^{-1} = 2 \text{ cal/cm}^2/\text{min} = 1,394 \text{ W m}^{-2}$$

Este valor es conocido como constante solar.

4.3 Características del espectro solar

La radiación emitida por el sol e interceptada por la tierra, se divide en tres fracciones principales:

	Longitud de onda ()	Porcentaje de la energía total
Rayos ultravioleta (uv, ó químicos)	0.2 μ - 0.36 μ	9 %
Radiación visible (luz, luminosos)	0.37 μ - 0.76 μ	41 %
Rayos infrarrojos (ir, térmicos ó caloríficos)	0.77 μ - 3.00 μ	50 %

Además existe una pequeña proporción de rayos equis (X) y gamma (γ) con longitudes de onda que van de 0.0005 μ a 0.001 μ .

En el cuadro 4.1 se ilustra la composición de la radiación solar.

Cuadro 4.1 Composición de la Radiación Solar.
(Jochen, et al. 1986).

LONGITUD DE ONDA (nm)	200-360	361-436	437-493	494-556	557-589	590-627	628-760	>760
COLOR DEL ESPECTRO	ultra-violeta (uv)	violeta	azul	verde	amarillo	anaranjado	rojo	infrarrojo (ir)
EFFECTO DE LA RADIACION	Absorción por las plantas		Reflexión y transmisión por las plantas		Absorción por las plantas			
Luz percibida por el ojo humano								

La radiación visible para los seres humanos se denomina luz y se encuentra entre las bandas de 360 nm a 760 nm. La onda que es percibida con mayor intensidad por el ojo humano es la de 550 nm. Existen otros organismos, como los insectos, que perciben radiaciones dentro de la banda de los rayos infrarrojos y, por tanto, pueden ver en lo que nosotros denominamos oscuridad.

Las plantas utilizan determinadas longitudes de onda corta para activar los procesos de la fotosíntesis (luz) y longitudes de onda larga (calor) para sus reacciones metabólicas. Dentro del espectro de la radiación solar, la

luz se presenta en cantidades suficientes y generalmente no constituye un factor limitativo para las plantas. Esto implica que el efecto más restrictivo de la radiación para las plantas lo constituye la temperatura y no la luz. Por ejemplo, en muchas regiones de latitudes y altitudes considerables, a pesar de existir suficiente luz, la temperatura (calor sensible) es tan baja que impide el crecimiento vegetal.

4.4 Efecto de la atmósfera sobre la radiación

La radiación solar que incide en el límite superior de la atmósfera no llega en su totalidad a la superficie terrestre, ya que sufre modificaciones apreciables en este trayecto, debido a diversos procesos.

Si se da a la radiación solar que entra en la atmósfera (en forma de ondas cortas) un valor arbitrario de 100 unidades, éstas se distribuirán aproximadamente de la forma siguiente (Figura 4.2):

a) La tierra recibe por radiación directa 31 %, por transmisión 16% y por dispersión 6%, es decir, un total de 53 unidades.

b) De éstas se devuelven por reflexión de la superficie terrestre (albedo) 6 unidades.

c) La atmósfera capta por absorción 17 unidades debido a las nubes y a las partículas atmosféricas.

d) Por reflexión y dispersión, de la atmósfera regresan 30 unidades al espacio.

Es conveniente mencionar que cada partícula de la atmósfera, como todo cuerpo emite su propia radiación. Toda partícula contenida en la atmósfera emite calor (ondas largas) generándose así una radiación calórica que también se orienta hacia la tierra y que se llama Radiación atmosférica. Esta radiación atmosférica es parte del balance total de radiación.

La radiación que se acumula en la tierra y en la atmósfera se transforma y vuelve al espacio en forma de ondas largas, evitando así un sobrecalentamiento de ambas. La energía devuelta por la tierra (47 unidades) sumada a la devuelta por la atmósfera (17 unidades) constituyen las 64 unidades necesarias para equilibrar el ingreso. Las cifras utilizadas para describir este balance de radiación representan un promedio aceptado a escala mundial. Estas cifras cambiarán al variar la latitud, las superficies

consideradas, la situación particular de la atmósfera y la hora del día.

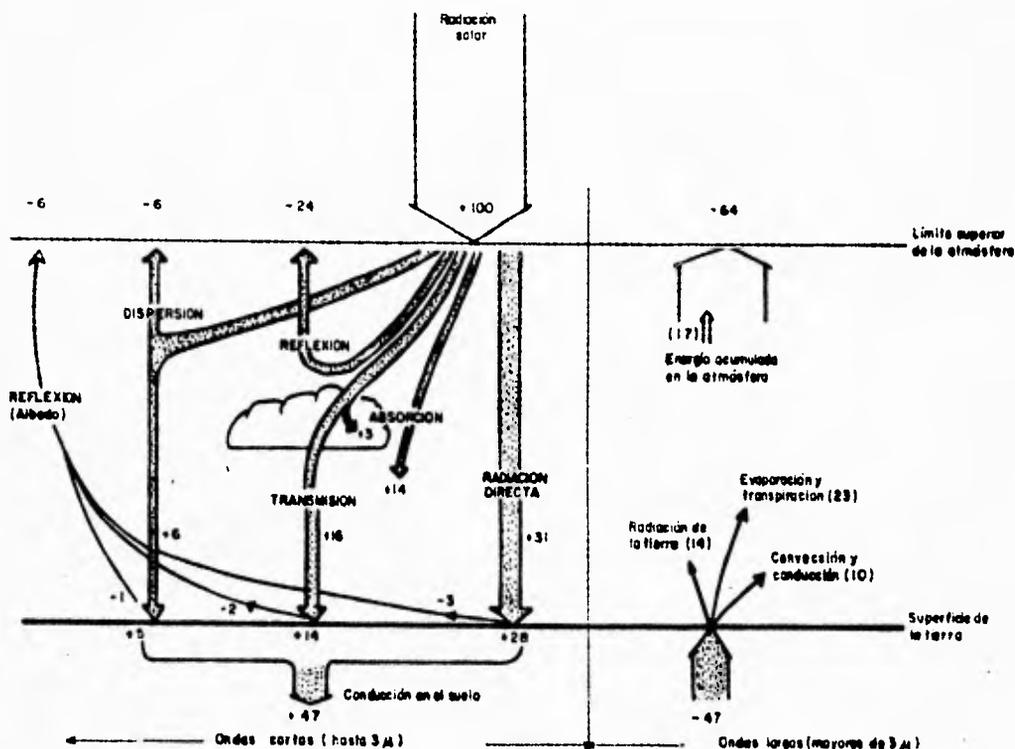


Figura 4.2 Distribución de la Radiación en la Atmósfera.
(V. Eirmern y Hoochel, 1984; Strahler, 1982;
Jochen, et al. 1986).

4.5 Efecto de la atmósfera en la radiación solar

No toda la radiación solar que incide en el límite de la atmósfera llega a la superficie terrestre. Esto se debe a que la atmósfera actúa sobre ella, produciendo distintos fenómenos, los cuales se explican a continuación.

Absorción.

Es la parte de la energía radiante captada por una sustancia; no es transmitida y se transforma en otra forma de energía, con frecuencia, en calor. La energía absorbida por la atmósfera calienta los estratos más altos de ésta.

Los componentes de la atmósfera tienen una absorción selectiva de longitudes de onda, como puede observarse en el cuadro 4.2.

En la atmósfera, el vapor de agua absorbe principalmente la energía emitida por la superficie terrestre. Es de notar que las nubes absorben energía en todas las longitudes de onda larga (mayores que 3μ). Cuanto mayor cantidad de sustancias (dióxido de carbono, vapor de agua, etc.) estén presentes en la atmósfera, mayor será su capacidad de absorción de energía. Este proceso ocurre con cierto retardo y, por tanto continua aún después de la puesta del sol. Esto impide el enfriamiento excesivo de la tierra durante la noche.

Transmisión.

Consiste en el paso de la energía a través de una sustancia. Las sustancias tienen un poder selectivo de transmisión, dependiendo de su composición química; es decir, solo permiten el paso de ondas largas impidiendo la penetración de gran parte de la radiación de onda corta. De esta forma se producen cambios cualitativos y cuantitativos de la radiación.

Cuadro 4.2 Absorción Diferencial de Energía por los Componentes de la Atmósfera. (Jochen, et al. 1986).

Sustancia	Longitudes de Ondas Absorbidas	
Dióxido de Carbono CO ₂	13.1 μ - 16.9 μ	infrarrojo
Vapor de Agua H ₂ O	5.3 μ - 7.7 μ	infrarrojo
Nubes (agua condensada)	mayores de 3 μ	
Ozono O ₃	0.2 μ - 0.36 μ	ultravioleta
Oxígeno (O ₂) y Oxido Nitrogeno (NO)	0.12 μ - 0.18 μ	rayos x, gamma ultravioleta

Reflexión.

Representa un simple cambio de dirección de los rayos sin que implique una penetración ni un cambio cualitativo ni cuantitativo de la radiación. En promedio, cerca del 24% de la radiación solar incidente sobre la atmósfera es reflejada por las nubes y devuelta al espacio exterior. Esto depende naturalmente del grado de nubosidad existente en cierto lugar y momento. Por ejemplo, en un día despejado logra

llegar a la superficie terrestre hasta un 70% de la radiación solar que penetra en la atmósfera mientras que en un día nublado, sólo llegaría un 10%.

Dispersión.

La dispersión consiste en un cambio selectivo de dirección de las diferentes longitudes de onda de la radiación, producido por moléculas individuales de nitrógeno, oxígeno, otros gases y aerosoles de la atmósfera. A diferencia de la reflexión, este fenómeno implica un cambio en las características cualitativas de los rayos luminosos.

La magnitud de la dispersión obedece a la Ley de Rayleigh, y responde a la fórmula:

$$ED = I / \lambda^4$$

donde:

ED = Eficiencia de dispersión
 I = Intensidad de radiación
 λ = Longitud de onda

Esta ley explica por qué la luz azul (con longitud de onda de 0.44μ) es dispersada aproximadamente diez veces más que la roja (de 0.7μ), lo cual se traduce en la coloración azul del cielo. La figura 4.2.A muestra la curva de intensidad relativa de las diferentes longitudes de onda del espectro solar.

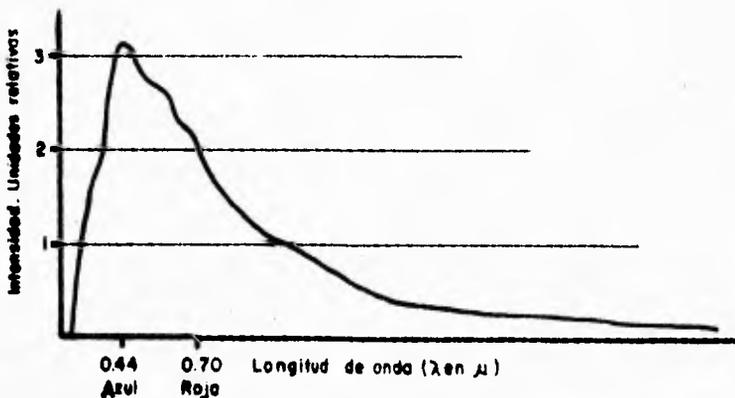


Figura 4.2.A Distribución de la intensidad relativa de la radiación solar según longitud de onda. (V. Elmern y Haeckel, 1984).

Para las ondas correspondientes al color azul tenemos una intensidad de 3 unidades y para el rojo cerca de dos unidades. Reemplazando en la fórmula de Rayleigh se tiene lo siguiente:

$$ED (\text{azul}) = 3 / (0.44)^4 = 80.04$$

$$ED (\text{rojo}) = 2 / (0.7)^4 = 8.33$$

El 12% de la radiación solar es dispersada en la atmósfera; de esta cantidad, el 6% escapa hacia el espacio, y el 6% restante llega a la superficie terrestre.

4.6 Efecto de la superficie terrestre sobre la radiación

Debido a los fenómenos anteriormente descritos, la superficie terrestre recibe aproximadamente el 53% de la radiación solar total: 31% como radiación directa y 22% como radiación difusa.

Parte de la radiación que incide sobre la tierra (en promedio, un 6%) vuelve por reflexión a la atmósfera. La porción de la radiación de longitud de onda corta devuelta a la atmósfera depende del coeficiente de reflexión de la superficie (Albedo)(figura 4.2). Sólo que algunos autores usan el nombre de albedo para referirse solamente a la fracción de radiación solar incidente (Vitkevich, 1972).

Algunos valores de Albedo se presentan en los cuadros 4.3 y 4.4. El albedo varía básicamente con el ángulo de incidencia de la radiación, de la composición material del cuerpo, con el color y la textura de la superficie reflectante. La reflexión en las superficies vegetales es afectada por la densidad de la cobertura y la posición de las hojas, además del grado de humedad de esas superficies (Bacsó, 1969).

Los coeficientes de reflexión de la vegetación en el trópico son en general menores que los de la vegetación en latitudes medias y altas, debido al ángulo de incidencia de los rayos solares. En las regiones tropicales, éstos inciden sobre la superficie terrestre en forma perpendicular, mientras que en las regiones templadas lo hacen en forma oblicua.

La parte de la radiación que llega al suelo y que no es reflejada (aproximadamente el 46% de la radiación que entra en la atmósfera) se emplea en calentar el suelo y el aire adyacente a él, así como en procesos de evaporación, transpiración y fotosíntesis.

Cerca del 2% de la radiación que llega a la superficie terrestre es fijada por el proceso de fotosíntesis. De esta radiación, la menor parte (0.6%) se pierde por respiración y la mayor parte (1.4%) se fija en forma de materia seca.

Cuadro 4.3 Valores de Albedo de acuerdo a la superficie incidente. (Jochen, et al, 1986).		
SUPERFICIE	ALBEDO (LUZ REFLEJADA %)	
AGUA	Nubes	45 - 90
	Líquida	5 - 12
	Mar	10
	Dulce	6 - 9
	Sólida	30 - 40
	Nieve en fusión	60
	Nieve fresca	75 - 90
	Nieve sucia	45
SUELO	Arena	10 - 25
	Arena seca	35 - 45
	Arena húmeda	20 - 30
	Arena amarilla	25 - 35
	Tierra laborable	15 - 30
	Suelo en barbecho seco	8 - 15
	Suelo en barbecho húmedo	5 - 7
	Suelo oscuro	5 - 15
	Suelo limoso seco	23
Suelo arcilloso	20	
	Hormigón	17 - 27
SUPERFICIES NATURALES	Desierto	25 - 30
	Pradera	10 - 20
	Pradera seca	15 - 35
	Cultivos	15 - 20
	Herbácea verde	20 - 35
	pastizales bajos	25 - 27
	pastizales altos	20 - 23
	Bosque	3 - 12
	Bosque de roble y pino	18
	Bosque de Abeto	14
	Bosque caducifolio	15 - 20
Bosque de coníferas	10 - 15	

Cuadro 4.4 Valores típicos de Albedo superficial y emisividad. Torres, 1983.

Superficie	Albedo (α)	Emisividad (ϵ)
Agua	.05 - .10	.95
Alfalfa	.20 - .25	.93
Algodonero	.17 - .25	
Arena seca	.18 - .30	
Arena amarilla	.25 - .35	
Bosque	.03 - .10	.90
Barbecho	.08 - .10	
Caña de Azúcar	.05 - .18	
Cebada	.20 -	
Citricos	.17 -	.93
Carreteras	.08 - .17	.93
Coníferas	.12 - .16	.90
Dunas (Arena)	.40 -	
Espinaca	.24 - .28	
Granos	.15 - .25	
Hierba verde	.15 - .20	
Hierba seca	.19 - .32	
Hierba mojada	.20 - .35	
Maíz	.12 - .24	
Nieve	.75 - .90	
Nieve fresca	.85 -	.91
Pedregal	.10 - .20	
Pradera natural	.15 -	.90
Pasto fresco	.25 -	
Pasto seco	.15 - .30	
Piña	.05 - .08	
Praderas gramíneas	.15 - .27	
Pradera alfalfa	.25 - .27	
Papa	.15 - .27	
Remolacha	.25 - .27	
Ríos	.06 - .11	
Salinas	.42 -	
Suelo oscuro	.05 - .16	.90
Suelo húmedo	.10 -	.97
Suelo claro	.20 - .43	.90
Selva conifera	.05 - .15	
Tinte negro	.04 -	.92
Tinte blanco	.85 -	.92
Trigo	.15 - .25	
Tierra vegetal	.10 - .25	
Vegetación desértica	.37 -	
Zonas urbanas	.16 - .45	

En el suelo, la radiación es transmitida en forma de calor (por conducción) desde las capas superficiales hacia las capas más profundas. La velocidad de conducción de calor depende de la textura del suelo, de su composición mineralógica, del contenido de humedad y de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del mismo.

El suelo emite radiación de onda larga (longitud mayor que 3μ) de acuerdo a su temperatura. La cantidad de radiación de onda larga (S) que es emitida, puede ser determinada por medio de la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$S = \sigma (t + 273)^4$$

donde:

S = Energía emitida en calorías por centímetro cuadrado y minuto.

$\sigma = 8.26 \times 10^{-11}$ (constante)

t = Temperatura de la superficie en grados celcius ($^{\circ}\text{C}$).

Esta ecuación es aplicable a cualquier cuerpo opaco y a longitudes de onda mayores que 3μ .

La cantidad de energía que se emplea en evaporación y Transpiración depende de la cobertura vegetal y del grado de humedad del aire. Cuanto mayor es la cantidad de plantas existentes en un lugar tanto mayor será la energía requerida en el proceso de transpiración. Donde no existan plantas, la energía se utilizará solamente en procesos de evaporación. Ambos procesos dependen también de la humedad del aire; cuanto más seco esté el aire tanto mayor será su capacidad para extraer vapor de agua de las plantas o del suelo, si existe suficiente radiación. Cuando el aire está saturado de vapor de agua, los procesos mencionados no pueden ocurrir ni siquiera en presencia de suficiente energía radiante. En promedio, entre el 60% y el 70% de la radiación incidente sobre la superficie terrestre se utiliza en los procesos de transpiración y evaporación. Sin embargo, existe una gran variabilidad de acuerdo con el tipo de vegetación y con el contenido de agua en el suelo y en las plantas.

4.7 El Balance de Radiación

La radiación neta (R_n) es igual a la diferencia entre la radiación total que llega al suelo y no es reflejada y la radiación emitida por la superficie terrestre:

$$R_n = R_s + R_d + R_a - (R_t + r_c)$$

donde:

R_n = Radiación neta
R_s = Radiación directa del sol
R_d = Radiación difusa de la atmósfera
R_a = Radiación atmosférica (ondas largas)
R_t = Radiación calorífica de la tierra
r_c = Reflexión de onda corta (albedo)

El balance de radiación se expresa en Julios/cm²/min.

El valor de la radiación calorífica a largo plazo es cero. A corto plazo, el valor depende de la hora del día, de la cobertura vegetal y de la transparencia (nubosidad) de la atmósfera. Así tenemos siempre un mayor o menor excedente de energía durante el día. Este excedente de energía será utilizado por las plantas, en primera instancia, para la transpiración y, en menor proporción, para la asimilación y en el calentamiento de las plantas y del suelo. Durante la noche, la energía acumulada es devuelta a la atmósfera en forma de calor latente (evaporación y transpiración) y de calor sensible (convección y conducción), lo cual genera un valor nocturno negativo.

La siguiente fórmula se puede utilizar para el cálculo de los componentes.

$$R_n = (S + A + LE + P + M) = 0$$

donde:

R_n = Radiación neta
S = Calentamiento del suelo
A = Calentamiento del aire o calor sensible
LE = Evapotranspiración o calor latente
P = Asimilación
M = Metabolismo

4.8 Efectos generales de la radiación sobre los organismos

Las diversas formas de radiación afectan en forma diferente a los fenómenos biológicos; por ejemplo, la radiación ultravioleta actúa en la destrucción de virus y bacterias y en la formación de la vitamina D, pero presenta también efectos perjudiciales, como el estímulo del cáncer en la piel y la fotooxidación de la clorofila. Los rayos

infrarrojos intervienen en los procesos calóricos, en la germinación de las semillas, en la floración y en la elongación de los tejidos vegetales.

Las longitudes de onda comprendidas entre 0.36 y 0.76 (radiación visible) desempeñan un papel muy importante en los procesos biológicos, tales como formación de sustancias orgánicas, transformación de materia, formación de pigmentos y proceso e fotosíntesis. Otros efectos biológicos son los de la irritación que se expresan en la fotoperiodicidad, el fototropismo, la fotomorfogénesis y los estímulos nerviosos.

Efectos Biológicos de la radiación visible.

Las plantas utilizan la radiación visible para la fotosíntesis. Presentan dos valores máximos de absorción correspondientes a los dos tipos de clorofila existentes: uno en la banda comprendida entre 361 nm y 495 nm, que corresponde al azul-violeta, y otro en la banda comprendida entre 590 nm y 760 nm, que corresponde a l rojo-anaranjado. El hecho de que las hojas sean verdes indica que las longitudes de onda entre 510 nm y 610 nm son reflejadas (figura 4.3).

Efectos Generales de la Radiación en el Crecimiento de las Plantas.

Best (1962) citado por Da Mota (1979), clasificó los efectos de la radiación, en especial de la solar, sobre las plantas en dos categorías:

A. Procesos de fotoenergía (Fotosíntesis)

B. Procesos de Fotoestimulos (movimientos, formación)

Movimientos (-orientación
 -tropismo
 -táctil)

Formación (-Elogación del tallo
 -Expansión de pigmentos
 -Pubescencia
 -Floración
 -Formación de Clorofila
 -Formación de Antocianina
 (sustancia que da el color azul o violado a
 los flores)

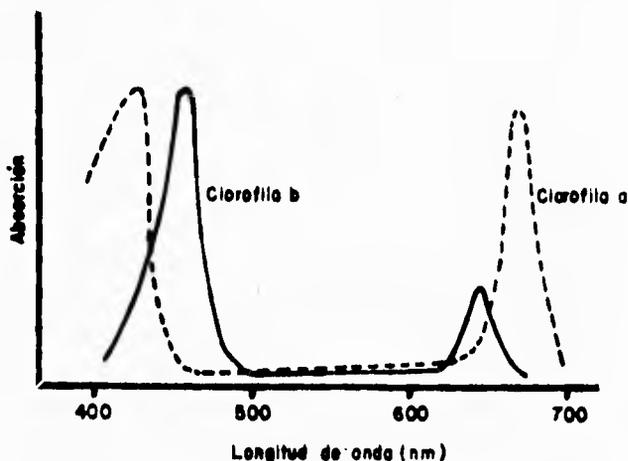


Figura 4.3. Relación entre la tasa de absorción de la luz por la clorofila a y b, y las diferentes longitudes de onda del espectro luminoso. Vives, 1982. Fuente : Jochen, et al, 1986.

4.9 Variación temporal y distribución geográfica de la radiación solar

Al observar el comportamiento de la radiación solar recibida por la tierra vemos que experimenta variaciones cíclicas durante el transcurso del día y a lo largo del año. Estas variaciones se originan en el movimiento de rotación de la tierra alrededor de su eje y en su movimiento de traslación alrededor del sol.

La insolación, es decir, la captación de la energía solar por unidad de área en un lugar cualquiera de la tierra depende, por un lado, del ángulo de incidencia de los rayos solares (figura No. 4.4) y, del tiempo de exposición a los rayos del sol de la superficie considerada.

La cantidad de insolación recibida sobre una superficie horizontal (I) está dada por la fórmula :

$$I = I_0 \text{ seno } h$$

donde:

- I_0 = Constante solar (2.0 cal/cm²/min).
 h = Altitud solar (el ángulo con el cual los rayos solares llegan a la superficie).

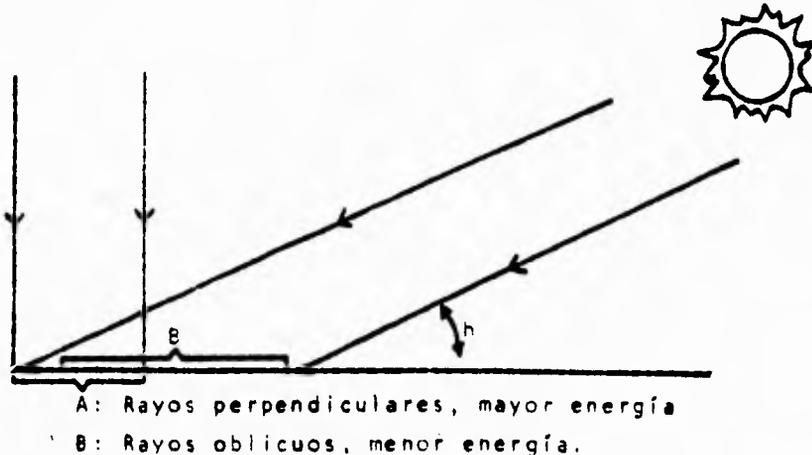


Figura 4.4 Ángulo de los Rayos Solares y Altitud Solar. Jochen, et al, 1986).

Así la insolación es máxima cuando los rayos del sol inciden perpendicularmente sobre una superficie, disminuyendo a medida que decrece el ángulo de incidencia de los rayos solares hasta alcanzar un mínimo cuando estos inciden tangencialmente sobre la superficie considerada. Esto se debe a que la misma cantidad de energía debe distribuirse sobre una superficie cada vez mayor según disminuya el ángulo de incidencia, de los rayos solares.

Por ejemplo, un ángulo de incidencia de 30° determina que la energía debe repartirse en el doble de la superficie que si los rayos incidieran perpendicularmente. Como se observa en la figura 4.5, la pendiente en un lugar cualquiera también desempeña un papel preponderante en la insolación recibida.

Dada la forma esférica de la tierra, sólo la parte relativamente pequeña de su superficie está, en un momento dado, en condiciones de recibir una máxima insolación. La insolación disminuirá a medida que nos alejemos de este punto, hasta desaparecer donde el ángulo de incidencia de los rayos solares es igual a 0°.

Si hacemos girar la esfera representada en la figura 4.7 de modo tal que el punto B se desplace hacia el A y el punto C hacia el punto B, todos los puntos de esta línea

recibirán un cierto momento una insolación máxima, cuando pasen por el lugar ocupado por el punto A (mediodía).

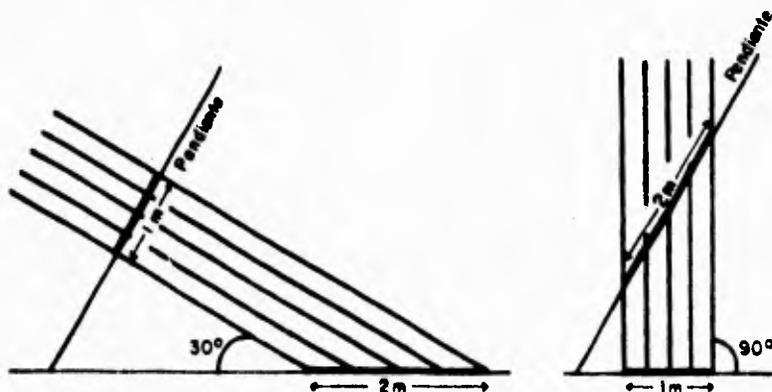


Figura 4.5 Aprovechamiento de la radiación solar según el Angulo de incidencia de los rayos solares. V. Eirmen y Haeckel, 1984. Fuente: Jochen, et al, 1986).

A medida que los puntos se alejan de A en el Arco D A E, recibirán cada vez menos insolación en el transcurso de toda la rotación. Al relacionar la tierra con la figura descrita, el ámbito comprendido entre los trópicos se encontrará según la estación del año, en situación similar a la línea A B C. Todos los lugares ubicados fuera de este ámbito reciben menor insolación debido a su ángulo de incidencia.

La situación descrita en la figura No. 4.6 está idealizada, de modo tal que el eje de la tierra ocupe una posición perpendicular a la dirección de los rayos solares. En la realidad, el eje de la tierra se encuentra inclinado 23.5° con respecto al plano hipotético en que la tierra gira alrededor del sol (plano de la eclíptica). El eje de la tierra mantiene una orientación fija con respecto a las estrellas, apuntando durante todo el año al mismo lugar del firmamento (figura 4.7). Como consecuencia de este fenómeno, existen puntos en el recorrido orbital en los que el Polo Norte de la tierra se acerca más al sol mientras el Polo Sur se aleja y en el punto diametralmente opuesto de la órbita, el Polo Norte se aleja mientras el Polo Sur se acerca. El punto de máximo alejamiento del Polo Norte respecto del sol se conoce como solsticio de invierno (22 de diciembre) y el punto de máximo acercamiento se conoce como solsticio de verano (21 de junio), las posiciones intermedias entre ambos solsticios son conocidas como

equinoccios. En esta posición el eje de rotación de la tierra forma un ángulo recto con una línea que pasa por el centro de la tierra y por el del sol, quedando ambos hemisferios igualmente iluminados. El equinoccio de primavera ocurre el 21 de marzo y el de otoño se presenta el 23 de Septiembre. En el solsticio de verano, los rayos solares caen perpendicularmente sobre los 23.5° de latitud norte, línea conocida como trópico de cáncer. En el otro hemisferio esta situación se produce el 22 de diciembre sobre los 23.5° de latitud sur, línea conocida como trópico de capricornio.

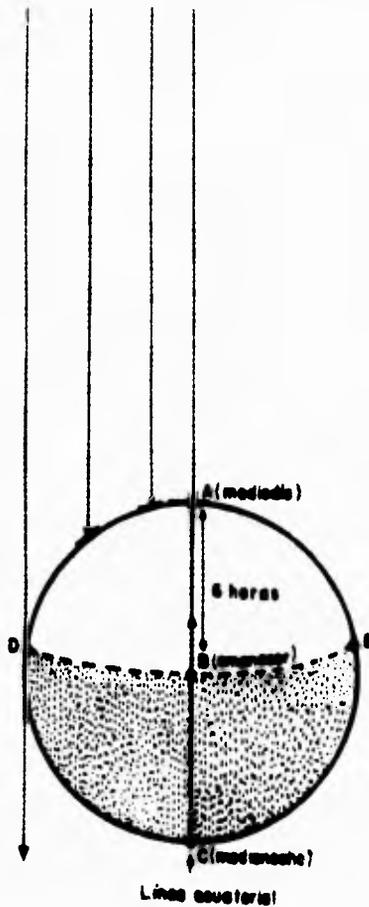


Figura 4.6. Situación idealizada de la incidencia de los Rayos Solares sobre la Tierra. (Jochen, et al. 1986).

Debido a la inclinación del eje de la tierra, la insolación en una latitud fija varía en las distintas estaciones del año. Estas diferencias aumentan hacia los polos donde se hacen máximas. Así el Polo Norte permanece oscuro y el Polo sur permanece iluminado durante el solsticio de invierno, a pesar de la rotación de la tierra (figura No. 4.7).

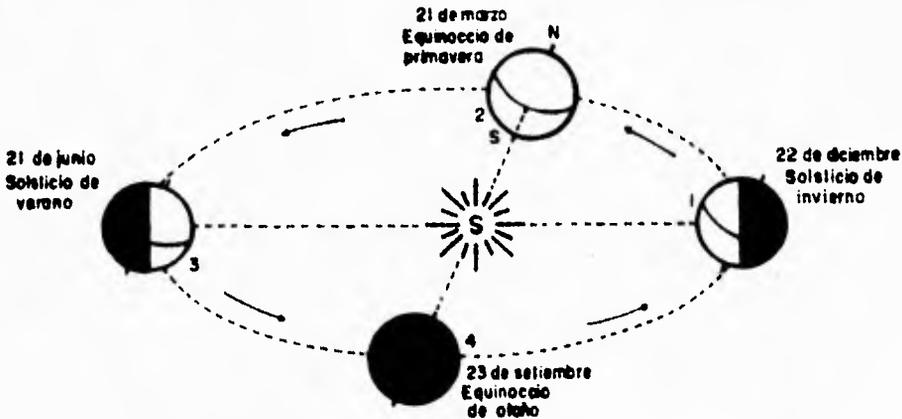


Figura 4.7 Traslación anual de la tierra alrededor del sol y formación de estaciones del año. V. Eirmen y Hackel, 1984. (Jochen, et al. 1986).

La figura No. 4.8 indica cómo varía la insolación con la latitud y con la estación del año, en una superficie horizontal fuera de las influencias atmosféricas.

La insolación en la línea ecuatorial presenta una variación anual de menos de 100 langleys, oscilando entre 800 langleys y 900 langleys; en cambio, en los polos las variaciones fluctúan entre 0 langleys y 1000 langleys en los diferentes meses del año.

Otra consecuencia de importancia en las variaciones cíclicas de la radiación solar la constituye la cantidad de horas de luz solar diarias. En el cinturón ecuatorial, el período de luz diario dura cerca de doce horas con pequeñas variaciones durante el año. Cuanto más cerca de uno de los polos nos encontremos, tanto mayor será la variación en la duración del día durante el año. Así la amplitud del día para el Polo Norte será de veinticuatro horas en el solsticio de verano y la de la noche de veinticuatro horas en el solsticio de invierno. En los equinoccios, la duración del día y de la noche es la misma en todas las latitudes dado que los rayos solares caen en ángulo recto sobre el ecuador y por tanto iluminan en forma pareja a ambos hemisferios (figura 4.7, puntos 2 y 4).

Las variaciones cíclicas mencionadas actúan sobre el comportamiento y la distribución de la vegetación y de la vida en general que se desarrolla sobre el planeta. La variación relativamente pequeña dentro del ámbito ecuatorial se traduce en una vegetación exuberante y de actividad fotosintética permanente durante todo el año. En las latitudes mayores (debido a la baja insolación durante una parte del año) se ve limitada la producción vegetal, mientras que en la otra parte del año tanto la duración del día como la intensidad de la insolación son tan altas que permiten, en cierta medida, compensar la pérdida de producción, alcanzando un cierto equilibrio con las zonas cálidas. Sin embargo, solo pocas especies soportan los fuertes cambios que se producen entre el invierno y el verano. Esto conduce a que, en general, la diversidad de especies disminuya con el aumento de la latitud (Figura 4.8).

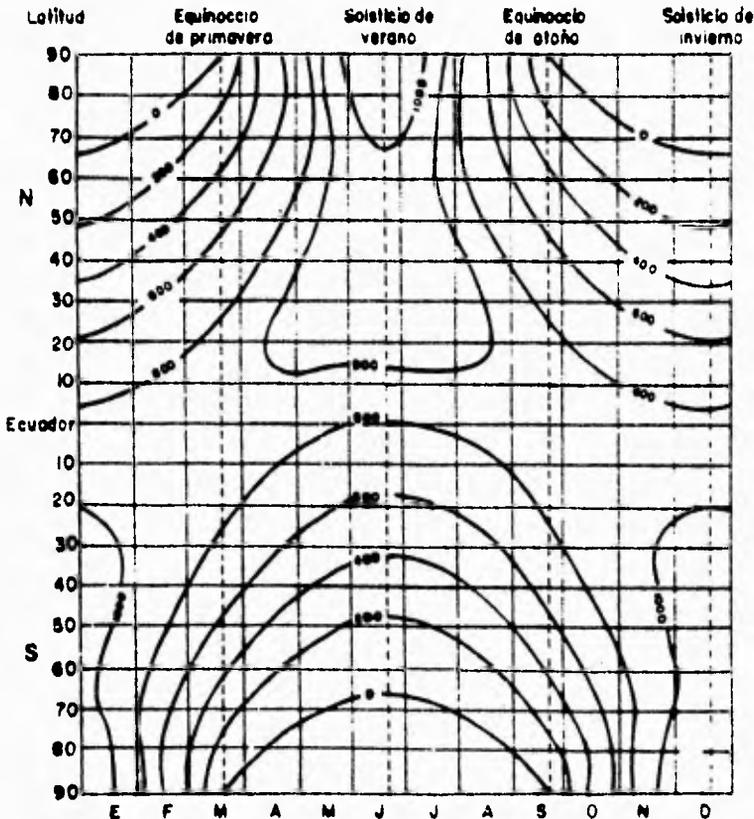


Figura 4.8 Radiación Solar en Langleys recibida en una superficie fuera de la atmósfera en función de la latitud. (Strahler, 1979).

4.10 Fotoperiodicidad

La fotoperiodicidad es la respuesta que presentan las plantas a la duración de la iluminación solar a lo largo del día (fotoperíodo). Aunque normalmente se habla de fotoperíodo (horas diarias de luz), se ha demostrado que el período de oscuridad (noche) es más importante con respecto al desarrollo vegetal. Este régimen puede ser casi constante durante el año, como ocurre en el ecuador terrestre o variar considerablemente, como acontece en las zonas templadas. Conforme nos alejamos del ecuador, la variación anual aumenta como ya se ha explicado.

Los organismos que se desarrollan en diversas latitudes están adaptados a su ambiente, de tal manera que sus ritmos biológicos están sincronizados con las condiciones prevaletentes en el lugar; entre ellas, el fotoperíodo. La mayoría de las respuestas de las plantas, tales como la elongación del tallo, el crecimiento de las hojas, la latencia, la formación de órganos de almacenamiento, la caída de las hojas y otras, están estrechamente relacionadas con la fotoperiodicidad.

La respuesta más conocida de las plantas al fotoperíodo es la floración, la cual es inducida por la exposición a un régimen favorable, que depende de la especie, así como del tiempo de exposición necesario para originar la floración.

De acuerdo con la duración del día más favorable para la floración, las plantas pueden clasificarse en tres grupos principales:

- a) Plantas de día largo: son aquellas que florecen cuando el número de horas de luz por día supera un nivel crítico de horas de luz, propio de la especie. Cuanto mayor sea el número de horas de luz, más rápido florecen. Por ejemplo, la caña de azúcar.
- b) Plantas de día corto: son aquellas que florecen cuando el número de horas de luz por día es menor que un número crítico propio de la especie. Cuanto menor sea el número de horas de luz, más rápido florecen.
- c) Plantas neutras: son las que tardan el mismo tiempo en llegar a la floración, independientemente de la longitud del día al que están expuestas. Por ejemplo el frijol, el sorgo.

Se considera que el tipo de respuesta al fotoperíodo es una característica de la especie; esto es, que todos los individuos de la misma especie presentan un comportamiento

similar: son de día corto, de día largo o neutras. Sin embargo, se han encontrado variedades o ecotipos (plantas de una misma especie, pero adaptadas a diferentes condiciones ecológicas) que presentan diferencias en su respuesta. Este es el caso por ejemplo del *Chenopodium album* que al crecer lejos del ecuador, responde a días más largos que si crece cerca de éste. Incluso se ha observado que algunas variedades de *Bouteloua curtipendula* se comportan como plantas de día largo y otras lo hacen como plantas de día corto (Salisbury, 1978).

En general, las plantas que crecen lejos del ecuador son más sensibles al fotoperíodo que las que se desarrollan cerca de éste (condiciones tropicales). Por ejemplo, el trigo necesita un día largo y por ello no se encuentra fácilmente en latitudes tropicales; por el contrario, el frijol no tiene esa sensibilidad. No obstante, se ha observado que algunas plantas tropicales como el maíz y el sorgo responden a variaciones leves en la longitud del día.

Las plantas presentan una edad mínima en la cual responden al estímulo fotoperiódico, y que varía con la especie. Algunas especies responden desde el estado cotiledonal, como es el caso de *Pharbitis nil* y otras no lo hacen sino hasta cuando alcanzan varios años de vida, como ocurre con muchos árboles. Entre estos extremos se presentan situaciones intermedias, pero normalmente se requiere que los brotes u hojas (órganos que reciben el estímulo fotoperiódico) alcancen cierta madurez para que puedan detectar el estímulo.

A menudo se presentan interacciones complejas entre el régimen del fotoperíodo y otros factores ambientales. Es común que las plantas presenten comportamientos específicos al fotoperíodo sólo a cierta temperatura. Estos comportamientos pueden cambiar radicalmente si cambia la temperatura. Por ejemplo, las especies *Euphorbia pulcherrima* (pastora) e *Ipomea purpurea* se comportan como plantas de día largo a baja temperatura, y como plantas de día corto a alta temperatura.

Como ya se indicó, el período de oscuridad desempeña un papel más importante en el comportamiento de las plantas, que el período de luz. Las plantas detectan y "miden" las horas de oscuridad por medio de un mecanismo aún no explicado del todo, denominado "Reloj Biológico". Este mecanismo es activado por un pigmento llamado Fitocromo, que se presenta bajo dos formas distintas: Fitocromo rojo largo, predominantemente durante las horas de luz (día) y el Fitocromo rojo, que prevalece durante las horas de oscuridad. La interacción secuencial de estas dos formas de pigmento es la que establece los ritmos biológicos que culminan con la floración.

La luz como factor morfogénico.

La Fotomorfogénesis. Puede definirse como la influencia de la luz sobre el desarrollo de la estructura de las plantas (o de los animales, según el caso). La luz es de especial importancia para la agrometeorología tanto por la cantidad como por la calidad de la luz recibida por los cultivos, o sea la intensidad de la radiación y el rango de longitud de onda.

La luz tiene importantes efectos morfogénicos en las plantas como son:

Tolerancia a la luz. De acuerdo a la intensidad de la luz, las plantas pueden clasificarse según los rangos de intensidad de luz en los que prosperen mejor, como : plantas heliófilas (de sol), plantas umbrófilas (de sombra) y plantas indiferentes. Como regla general, las hojas de las plantas umbrófilas son más transparentes que las de las heliófilas.

Etiolación. Esta condición se presenta cuando la intensidad de la luz, no es suficiente para el desarrollo normal de las plantas. A bajas intensidades de la luz, las plantas tienden a incrementar el alargamiento del tallo, y además de entrenudos largos y delgados presentan clorosis general y malformación en las hojas.

Fototropismo. La dirección de la cual proviene la luz, determina en alto grado la dirección del crecimiento de los tallos y las hojas.

La luz es responsable de muchos movimientos de crecimiento o tropismos de las plantas. No todas las plantas y no todas las partes de las mismas responden en la misma forma a este estímulo. Como regla general el tallo se curva hacia la fuente de luz, la raíz lo hace alejándose de esta fuente de luz y la hoja toma una posición en la que la superficie ancha del limbo queda perpendicular a los rayos de luz. Cualquier movimiento que sea una reacción al estímulo de la luz se conoce como Fototropismo . Por consiguiente se dice que un tallo normal es positivamente fototrópico, una raíz negativamente fototrópica y una hoja transversalmente fototrópica o diafototrópica.

La radiación infrarroja IR-A e IR-B es la parte térmica de la radiación solar y sus efectos sobre las plantas son de incremento de la temperatura.

En la mayoría de las plantas, la luz tiene efectos inhibidores o retardadores de la germinación; sin embargo, en algunas plantas la germinación es estimulada por la

energía solar, ya que son sensibles a la luz (fotoblásticas), como sucede en algunas hortalizas.

En la cuadro 4.5 se presentan algunos efectos de la radiación solar sobre las plantas, así como la sensibilidad espectral del ojo humano.

Cuadro 4.5 Calidad y efectos de la radiación solar sobre las plantas. (Jochen, et al. 1986)

BANDA	Longitud de onda λ		Frecuencia v (ondas por segundo)	Sensibi- lidad es- pectral del ojo humano %	Efectos sobre las plantas
	(cm)	(Å)			
UV-A	2.8×10^{-7}	2800	1.1×10^{15}	Invisible	Detrimental
UV-B	3.2×10^{-8}	3200	9.4×10^{14}	Invisible	Detrimental
Violeta	De: 3.7×10^{-7}	3700	8.1×10^{14}	1	Detrimental Fototropismo
	A: 4.4×10^{-7}	4400	6.8×10^{14}		
Azul	De: 4.4×10^{-7}	4400	6.8×10^{14}	1	Cambio de vis- cosidad proto- plásmica. Asimilación CO_2
	A: 5×10^{-7}	5000	6×10^{14}		
Verde	De: 5×10^{-7}	5000	6×10^{14}	21	Asimilación CO_2 Asimilación CO_2
	A: 5.5×10^{-7}	5500	5.5×10^{14}		
Amarilla*	De: 5.5×10^{-7}	5500	5.5×10^{14}	67	Asimilación CO_2 Incremento en vi- gor, tamaño y calidad de fru- tos.
	5.7×10^{-7}	5700	5.3×10^{14}	90	
	A: 5.9×10^{-7}	5900	5.1×10^{14}	81	
Naranja	De: 6×10^{-7}	6000	5×10^{14}	57	Asimilación CO_2 Germinación de semillas y creci- miento de plan- tas y frutos jó- venes.
	A: 6.3×10^{-7}	6300	4.8×10^{14}	44	
Roja	De: 6.3×10^{-7}	6300	4.8×10^{14}	44	Germinación de semillas Asimilación CO_2
	A: 7.6×10^{-7}	7600	3.9×10^{14}	8	
IR-A	1.4×10^{-4}	14000	2.1×10^{12}	Invisible	Temperatura
IR-B	3×10^{-4}	30000	1×10^{12}	Invisible	Temperatura

* Observaciones hechas en cultivo de tomate bajo invernadero con cubierta de polietileno amarillo. Universidad "Antonio Narro" de Saltillo, Coah., México.

4.11 Estimación de la radiación solar

Debido a la escasez de estaciones meteorológicas que registren la radiación solar en forma directa (cal/cm²/min), muchos autores han desarrollado relaciones empíricas en localidades específicas para estimar radiación solar con base en la duración de la insolación ó bien utilizando el grado de nubosidad.

A. Estimación de la Radiación Solar a partir de la insolación.

Angstrom (1924) (citado por Chag, 1968) propuso por primera vez la siguiente relación para estimar radiación solar a partir de la insolación.

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a$$

Reducción de la Radiación Solar
934 Wm⁻² = 1.34 cal cm² día

donde:

- R_s = Radiación solar, expresada en cal/cm²/min ó mm de agua evaporable.
- n = número real de horas de insolación (registradas con heliógrafo)
- N = duración máxima posible de la insolación
- R_a = radiación solar teórica que recibiría la superficie terrestre en ausencia de atmósfera. Conocidos como valores constantes de Angot que se encuentran tabulados de acuerdo a la latitud.
- a y b = coeficientes de regresión, los cuales varían con la localidad.

Los cuadros 7.5 y 7.6 (en el capítulo 7) muestran valores para N y R_a para todos los meses y diferentes latitudes. Los valores de R_a están expresados como el valor promedio en mm de agua evaporable por día.

Para convertir calorías a mm de agua evaporable se usa la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \text{mm H}_2\text{O} &= \text{calorías}/58.6 \\ \text{calorías} &= \text{mm H}_2\text{O} \times 58.6 \end{aligned}$$

Frerè y Popov (1979) a partir de muchas mediciones hechas en diferentes zonas del mundo, indican que tres conjuntos de coeficientes pueden ser usados, dependiendo principalmente de las condiciones climáticas de la zona. Los coeficientes a y b determinados por estos autores son los siguientes:

a	b	zona
0.18	0.55	Zonas frías y templadas
0.25	0.45	Zonas tropicales secas
0.29	0.42	Zonas tropicales húmedas

En la determinación de los coeficientes a y b para estimar radiación solar haciendo uso de la insolación, deberá considerarse no sólo las diferencias de un lugar a otro debidas a latitud y clima, sino también aquellas debidas al régimen estacional de energía solar. Es decir, se sugiere que los coeficientes a y b debieran estimarse para cada mes, o por lo menos para cada estación. La estimación de éstos coeficientes es recomendable realizarla con datos de radiación solar e insolación en todos aquellos lugares donde sea posible.

Ejemplo:

Estimación de la radiación solar promedio para Guadalajara, Jal., durante el mes de agosto, a partir de datos de insolación:

$$\begin{aligned}
 \text{Lat.} &= 20^{\circ} 44\text{N} \\
 n &= 6.7 \\
 N &= 12.8 \text{ (ver cuadro 7.5, en el capítulo 7)} \\
 R_a &= 15.83 \text{ (ver cuadro 7.6, en el capítulo 7)} \\
 a &= 0.29 \\
 b &= 0.42 \\
 R_s &= (0.29 + 0.42 \cdot 6.7) \cdot 15.83 \\
 &= 8.08 \text{ mm H}_2\text{O/días} \\
 R_s &= 8.08 \times 58.6 = 473.2 \text{ calorías/cm}^2\text{/día}
 \end{aligned}$$

B. Estimación de la Radiación Solar con la Nubosidad.

La radiación solar también puede ser estimada a partir del grado de nubosidad, en todos aquellos lugares donde no se tengan registros de insolación.

Para estimar la radiación solar usando el grado de nubosidad es requisito que se cuente con varias observaciones diarias de nubosidad (ejem: 8 hrs, 12 hrs y 16 hrs) para un período largo de tiempo.

El grado de nubosidad es expresado en octavos de cielo cubierto (0 a 8) ó bien, en décimos de cielo cubierto (0 a 10), el cual para ser convertido a radiación solar, debe ser primero convertido a su valor equivalente de n/N. El cuadro 4.6 puede usarse como una guía aproximada.

Cuadro 4.6. Relación aproximada de nubosidad con n/N
(Doorenbos y Pruitt, 1977)

Nubosidad (octavos)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Relación n/N	.95	.85	.75	.76	.55	.45	.3	.15	-

Nubosidad (Décimos)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Relación n/N	.95	.85	.8	.75	.65	.55	.5	.4	.3	.15	

Luego, para obtener valores de radiación solar a partir del grado de nubosidad, es sólo subsistir los datos iniciales en la fórmula descrita anteriormente.

$$R_s = (a + b n/N) R_a$$

En México el grado de nubosidad se registra únicamente en 3 categorías: Despejado, medio nublado y nublado/cerrado. Para convertir estas categorías a la escala de octavos ó décimos se han propuesto las siguientes codificaciones:

Codificación en Octavos

días despejados = 1
días medio nublados = 3
días nublados/cerrados = 7

Codificación en Décimos

días despejados = 1
días medio nublados = 5
días nublados/cerrados = 9

Para obtener la nubosidad media (C) para un período determinado (1 día, 10 días, 1 mes, etc) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$C = \frac{(N^{\circ} \text{d. desp. } X1) + (N^{\circ} \text{d. } 1/2 \text{ nub. } X3) + (N^{\circ} \text{días nub/cerr} X7)}{N^{\circ} \text{ total de días}}$$

(Octavos)

$$C = \frac{(N^{\circ} \text{d. desp. } X1) + (N^{\circ} \text{d. } 1/2 \text{ nub. } X5) + (N^{\circ} \text{días nub/cerr} X9)}{N^{\circ} \text{ total de días}}$$

(Décimos)

Con los valores de nubosidad media C así obtenidos, es posible desarrollar relaciones a nivel regional entre éstos, y valores conocidos de radiación solar (registrada en calorías) de la forma siguiente:

$$R_s = a + bx \quad \text{ó bien} \quad R_s = a + bx + bx^2$$

donde:

R_s = radiación solar
 a = ordenada al origen
 b = coeficiente regresión
 x = grado de nubosidad

Ejemplo 2:

Con fines de ilustración de la estimación de radiación solar a partir del grado de nubosidad, se presenta el siguiente ejemplo para Colima, Col. para el mes de septiembre.

Latitud $19^{\circ} 15'N$
 Nubosidad media C (décimos) = 6.7
 Equivalente de C en n/N = 0.43 (ver cuadro 4.6)
 a = 0.29
 b = 0.42
 R_a = 14.88 (ver cuadro 7.6,
 en el capítulo 7)

$R_s = (a + b n/N) R_a$
 $R_s = (0.29 + 0.42 \times 0.43) 14.88$
 $R_s = 7.00 \text{ mm H}_2\text{O/día}$
 $R_s = 7 \times 58.6 = 410.3 \text{ cal/cm}^2\text{/día}$

CAPITULO 5

LA TEMPERATURA EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LA VEGETACION .

5.1 Introducción

Generalidades.

La temperatura es la medida de la energía cinética promedio de las moléculas de una sustancia. Es, por consiguiente, una medida de intensidad, en un momento determinado. La cantidad de calor, en cambio, es la suma de la energía que poseen todas las moléculas de una sustancia. Aunque la temperatura es proporcional a la cantidad de calor, no es equivalente a ésta, debido a que dos sustancias pueden tener la misma energía cinética promedio por molécula (la misma intensidad) pero diferente número de moléculas por unidad de volumen. Se requiere más energía para aumentar la temperatura de un cuerpo cuantas más moléculas posea éste por unidad de volumen. De esto se desprende que cuantas más partículas tenga un cuerpo por unidad de volumen, mayor será su capacidad para almacenar calor. Por ejemplo, un metro cúbico de agua y uno de aire pueden tener la misma temperatura, pero el agua contiene más calor, ya que un metro cúbico de agua tiene más moléculas que un metro cúbico de aire.

El calor es una forma de energía (energía térmica), que puede transferirse de un cuerpo a otro si entre ellos existe una diferencia de potencial energético. Se reconocen dos categorías de calor: el calor sensible y el calor latente. El primero es aquél que puede ser registrado como temperatura de un cuerpo, ya sea éste sólido, líquido o gaseoso. El segundo es la energía utilizada en un cambio de estado y por lo tanto no se manifiesta como un cambio de temperatura del cuerpo. Algunas formas de calor latente son: el calor de vaporización, el calor de condensación, el calor de fusión, etc.

Por ejemplo, el paso del agua del estado líquido al gaseoso, requiere 2.450 julios por gramo o el equivalente de 600 cal. por gramo, si la temperatura inicial es de 20° C y la presión es de una atmósfera. La misma energía que se necesitó para la evaporación se libera en la condensación, que es el paso del estado gaseoso al líquido.

Existen cuatro formas de intercambio energético: **convección, conducción, radiación y transporte de calor latente.**

La convección es el transporte ascendente de calor de las corrientes líquidas o gaseosas. Cuando el movimiento es horizontal, se conoce como advección.

En la atmósfera, la mayor parte del transporte de energía ocurre por convección hasta una altura de 1000 m. aproximadamente, durante el día.

La conducción es la transferencia de energía térmica entre moléculas que se encuentran en contacto. Esta es la forma común de transporte de energía entre de cuerpos sólidos y líquidos. También el calentamiento de la capa de aire más baja de la atmósfera se lleva a cabo por medio de conducción, al entrar en contacto con el suelo caliente. En este caso, la conducción afecta sólo a la capa más cercana al suelo, la cual se estima que no sobrepasa los tres centímetros.

La radiación es la emisión de energía de todo cuerpo que presente una temperatura mayor de cero grados Kelvin (cero absoluto, que corresponde a -273°C). Esta emisión se realiza por medio de ondas electromagnéticas y, por tanto, no requiere un medio para su transmisión. Por ejemplo, la energía producida por el sol que llega hasta la tierra pasa por un espacio en que no hay atmósfera.

El transporte de calor latente es el que se genera en los cambios de estado de la materia, como se explicó anteriormente.

5.2 Influencia de la temperatura en el desarrollo y crecimiento de la vegetación

Temperatura y Crecimiento.

Las variaciones de la temperatura tiene gran influencia sobre los procesos fisiológicos de plantas y animales. Cada proceso es posible sólo dentro de un determinado rango de temperatura, en donde se dan un valor mínimo, un valor óptimo y un valor máximo. Estos valores pueden variar con la edad, el estado de desarrollo, la especie y la interacción con otros factores.

Se pueden definir estos valores de la siguiente manera:

Temperatura mínima = La más baja en la que se produce crecimiento.

Temperatura máxima = La más alta en la que se produce

crecimiento.

Temperatura óptima = Aquélla en la que se registra el máximo crecimiento.

Por ejemplo, para el cacao, la temperatura mínima es de 15°C, la máxima de 35°C, aproximadamente y la óptima de 26°C.

La temperatura mínima, en la cual se cesa el crecimiento de una especie, puede no ser la misma que la mínima es la que puede subsistir sin sufrir daño. Así también, la temperatura máxima de crecimiento de una planta puede ser considerablemente menor que aquélla que la que le ocasiona daño por exceso de calor. Por ejemplo, en el cacao, a 40.5°C puede hacer cesar el crecimiento y a 54.4°C puede ser letal, si se mantiene por algún tiempo.

La velocidad de transpiración de las plantas depende, en gran parte, de la temperatura. Esta interviene en casi todas las reacciones y procesos más importantes de la naturaleza, tales como la asimilación o fotosíntesis y la desasimilación o respiración, las cuales dependen especialmente de este elemento. La mayor parte de las plantas tienen su óptimo de producción a temperaturas comprendidas entre 20°C y 25°C. En casos extremos de altas temperaturas, sobre los 40°C, se puede producir la disminución de las proteínas causando la muerte de las plantas.

Las temperaturas bajas son el factor principal que limita la distribución de las especies. Los límites mínimos de temperatura varían mucho de una especie a otra. Para cada especie existe un punto en el cual cesa el crecimiento. Por debajo de este umbral se pueden producir daños, que pueden ser reversibles o no. Es necesario hacer notar que para las especies de zonas frías éstos límites son muy bajos.

Tanto en el caso de temperaturas altas como en el de las bajas, el tiempo de exposición y la etapa del desarrollo (germinación, floración, fructificación, etc.) son determinantes.

Por lo tanto, en la distribución de las especies no sólo son importantes los valores medios de temperatura, sino la amplitud térmica diaria o rango, que es la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima durante el día.

También son de gran importancia de valores medios de las temperaturas máximas y mínimas, así como los máximos y los mínimos absolutos que son el valor más alto y el más bajo que se presentan, respectivamente, en un período dado.

Influencia sobre el crecimiento.

Swets y Zeitlinger (1975) consideran la importancia de la temperatura cuando indican que cualquiera que sea la disponibilidad de la luz solar, de nutrimentos, o de agua, existen niveles de temperatura por debajo y por encima de los cuales el crecimiento de los cultivos no se manifiesta, siendo éstos niveles el mínimo y el máximo de crecimiento. Pero además existe un nivel óptimo en el cual el crecimiento es máximo, dicho nivel es el óptimo de crecimiento, a estos niveles se les ha llamado temperaturas cardinales.

Bierhuizen (1973) indica que los vegetales superiores efectúan gran cantidad de procesos fisiológicos en temperaturas entre 0 y 40°C. En este rango hay cultivos que requieren bajas, moderadas o altas temperaturas; agrega que aunque el mejoramiento genético ha ampliado el rango de adaptación, desde el punto de vista agronómico la temperatura continúa siendo de vital importancia en el crecimiento, desarrollo y rendimiento agrícola. Este autor señala, que si se conocen los requerimientos térmicos de una especie vegetal, se puede seleccionar el área más favorable para su desarrollo.

Papadakis (1960) al referirse a la influencia de la temperatura en el crecimiento, expresa que éste aumenta cuando la temperatura sube de 0 a aproximadamente 20°C. Pero después de este nivel el aumento se hace cada vez menos rápido, y a partir de cierto límite, el crecimiento se restringe mientras la temperatura sube.

Influencia sobre el Desarrollo.

La temperatura afecta el desarrollo de las plantas a través de su influencia sobre la velocidad de los procesos metabólicos. Temperaturas bajas retardan el desarrollo, mientras que altas temperaturas (hasta un cierto límite) aceleran el desarrollo y acortan el ciclo vegetativo de las plantas. Para describir la influencia de la temperatura sobre la fonología de las plantas se ha usado desde el siglo XVIII el concepto de sumas de temperatura, más conocido como unidades calor, grados día, ó unidades térmicas de crecimiento. El crecimiento y desarrollo de un cultivo dependen de la cantidad de calor que las plantas reciben. Esto quiere decir, que un cultivo alcanzará una determinada etapa fenológica cuando haya recibido cierta cantidad de calor, independientemente del tiempo requerido para ello (Hodges y Doraiswamy, 1979).

Según **De Fina y Ravelo** (1973) hace aproximadamente 210 años Reamur inició los trabajos sobre acumulación térmica en los cultivos. Este autor consideraba que al sumar la temperatura media diaria durante el ciclo del cultivo se obtendrían los requerimientos calóricos. Indicaba que la

suma de temperaturas para un mismo cultivo será siempre la misma y le llamó constante térmica. Encontró que de siembra a madurez el trigo requiere 2000°C, la cebada 1700°C, y el maíz 2500°C. Aunque posteriores investigaciones han indicado que, la suma de temperaturas es variable, según la variedad, la fecha de siembra y la localidad.

Damarío y Pascale (1974) determinaron para Argentina la disponibilidad de unidades de calor sobre diferentes temperaturas base (0, 5, 10, 15 y 20°C). Estos autores mencionan que para propósitos agrícolas la información climática disponible debe ser valorada de una manera especial, tomando en cuenta la acción cualitativa y cuantitativa que cada elemento meteorológico ejerce sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Señalan también que es necesario transformar la información climática original a índices o parámetros biometeorológicos, mediante los cuales se cuantifica el grado de influencia que los principales elementos meteorológicos manifiestan sobre los procesos vitales y productivos de las plantas. Agregan que la temperatura del aire es el elemento al que se le asigna mayor importancia como causa de las variaciones que experimentan el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos agrícolas, y que los vegetales necesitan acumulación calorífica para el cumplimiento de los procesos de crecimiento y desarrollo.

Sastry y Chakravarty (1982) en un trabajo que efectuaron en la India sobre sumas de índices energéticos para trigo, indican que de los muchos trabajos que se han realizado sobre eventos tecnológicos y fechas de maduración de cultivos, las unidades calor han sido las más utilizadas. Mencionan que de las variedades insensibles a fotoperiodismo, el porcentaje de desarrollo puede ser considerado como función de la energía recibida y de las condiciones de temperatura de la estación.

Peterson (1965) cita que muchas investigaciones se han realizado sobre la cantidad de requerimientos de calor para diferentes variedades de trigo sembradas en diferentes ambientes y estudiadas en estados de desarrollo que van desde la germinación a la madurez. Mencionan que uno de los problemas básicos en tales estudios es la selección de un sistema que exprese los requerimientos de temperatura de los cultivos, y que en este sentido, uno de los más ampliamente usados es el concepto de unidades de calor.

De Fina y Ravelo (1973) además de indicar la metodología que utilizó Reamur en la suma de unidades de calor y que se le denominó método directo, citan otros métodos como es el residual, el cual consiste en restar a la temperatura media una temperatura base (temperatura mínima de desarrollo). El método exponencial cuyo principio se basa en la ley de Vannt Hoff y Arrhenius que dice que la

velocidad de las reacciones se duplica por cada aumento de 10°C en la temperatura. El método fisiológico el cual está basado en la respuesta fisiológica de las plantas a la temperatura.

Azpiazu (1971) utilizó las unidades de calor para el pronóstico de etapas fenológicas en maíz dentado en Iowa, E.U.A. Este autor propone que las clasificaciones de los vegetales en relación a la duración en días de su ciclo vegetativo, es poco adecuada, puesto que existe una correlación baja entre el número de días y el desarrollo de las plantas. Esto es debido a que la duración real de los períodos fenológicos de una especie varían con los cambios ambientales. Este investigador señala, que las clasificaciones deberán basarse en mediciones de aquellos componentes ambientales responsables de la variación del número de días para alcanzar una fase dada; y en este sentido la temperatura es una de las necesidades bioclimáticas más importantes.

Cross y Zuber (1972) probaron 22 métodos de unidades calor para estimar etapas fenológicas del maíz en Missouri, E.U.A. Estos autores encontraron que en la estimación de unidades calor las temperaturas diarias (máximas y mínimas) dieron casi igual resultado que las temperaturas horarias. Además encontraron que la mejor temperatura base para estimar la floración del maíz fue 10°C con 30°C como máxima óptima.

El concepto de unidades de calor, no obstante su falta de bases teóricas y firmes, ha sido ampliamente usado para propósitos de planeación y operación agrícolas, ya que su cálculo y aplicación es muy fácil. El éxito de este concepto depende de la estrecha relación que existe entre temperatura y radiación solar, temperatura y fotoperiodo, y la adaptación de variedades a fotoperíodos locales (Hodges y Doraiswamy, 1979).

Otro de los usos que han tenido las unidades calor es en la predicción de etapas biológicas de insectos (Ruesink, 1981, Wilson y Barnett, 1983). Byerly (1978) en un trabajo en el que indica las aplicaciones de la temperatura en la experimentación agrícola, presenta la relación estrecha que existe entre el desarrollo de insectos y las unidades de calor acumuladas.

El Concepto de Unidades Fototérmicas.

El concepto de unidades de calor supone que el fotoperíodo no afecta la tasa de desarrollo de las plantas. Sin embargo, para ciertas especies de variedades de una misma especie, se han observado efectos muy marcados por fotoperíodo durante ciertas etapas de desarrollo (Hodges y

Doraiswany, 1979). Para cuantificar la interacción de temperatura y fotoperíodo, sobre el desarrollo de las plantas, el concepto de unidades de calor se ajustó combinándose con la longitud del día. De esta manera se obtuvieron los índices heliotérmicos ó unidades fototérmicas.

Sobre unidades fototérmicas se han realizado muchos trabajos, a partir de que Geslin en 1944 (citado por De Fina y Arvejo, 1973) propuso el método. Son notables los trabajos desarrollados en cereales pequeños por Nuttinson (1955); Robertson (1968); Pascale (1969) quien determinó los requerimientos bioclimáticos de trigos argentinos en base a índices heliotérmicos, y aquellos de Pascale y Escales (1971) quiénes obtuvieron los requerimientos bioclimáticos de la soya en el mismo país.

Influencia de las Bajas Temperaturas.

La acción que ejercen las bajas temperaturas en los cultivos no siempre es perjudicial, debido a que las plantas invernales y las perennes caducifolias, en mayor o menor grado requieren de un período de enfriamiento o vernalización. Este período de frío es necesario para cumplir posteriormente su desarrollo sin anomalías fenológicas ni alteraciones en el rendimiento. Los niveles térmicos debajo de los cuales se considera que los vegetales empiezan a acumular el efecto vernalizante varía entre poco menos de 10°C dependiendo de la especie, variedad y año. Sin embargo, se ha generalizado de 0 a 5°C para cereales invernales, y de 6 a 7°C para frutales que necesitan frío (Swets y Zeitlinger 1975).

Damarío (1969) en un trabajo realizado para determinar la distribución de horas de frío en Argentina, señala que uno de los objetivos fundamentales en la agroclimatología consiste en evaluar la aptitud agrícola de los distintos climas, para ello recurre a la interpretación de las condiciones climáticas mediante el uso de los índices biometeorológicos. Con estos índices es posible caracterizar las diferentes regiones climáticas en función de las exigencias y tolerancias de los cultivos. Indica que una de tales exigencias es la "exigencia en frío" de las especies de perennes de follaje caduco ó anuales invernales. Además, indica que el valor de 7°C ha sido usado como límite superior de las temperaturas con acción favorable de enfriamiento; designándose como horas frío a la cantidad de horas en la que la temperatura del aire permanece debajo de tal nivel. Agrega que la utilización de horas frío ha permitido explicar con éxito las variaciones fenológicas y productivas que muestran las especies exigentes de frío.

Durante el período inductivo de la vernalización existen alternativas a distintos niveles de temperatura que tienen efectos diferentes sobre las plantas. Por ejemplo, días con temperaturas bajas sin correspondientes temperaturas máximas elevadas, satisfacen más rápidamente las necesidades de enfriamiento, por otro lado si se presentan temperaturas máximas elevadas la satisfacción en bajas temperaturas es menor y cuando es muy prolongada esta evaluación térmica ocurre la desvernalización (eliminación del enfriamiento acumulado). Erez y Lavee 1971 (citados por Sweets y Zeitlinger 1975).

Para resolver el problema mencionado en el párrafo anterior, Ashcroft et al, (1977) propusieron otro método para estimar la cantidad de frío que requiere cada especie frutal para completar su período de dormancia. Este método utiliza el concepto de unidades de frío en lugar de horas frío. Una unidad frío como la definen estos autores, es igual a una temperatura de 6°C con duración de una hora. Su método propuesto está basado en principios fisiológicos, ya que al subir o bajar la temperatura del punto óptimo de 6°C, su contribución en la acumulación de unidades de frío se reducirá a cero, a una temperatura de -1.1°C, o bien de 15.6°C. La acumulación de unidades frío a temperaturas >15.6°C es negativa.

El concepto de unidades frío para estimar el período de dormancia en frutales caducifolios ha sido utilizado por varios investigadores (Richardson, et al, 1974, Lombard y Richardson, 1979).

Influencia por Variación (oscilación térmica).

La oscilación o amplitud térmica constituye también un elemento importante cuando se desea caracterizar una zona desde el punto de vista de temperatura. En este aspecto también se han obtenido importantes observaciones de su influencia sobre el desarrollo de los cultivos.

Darwin a mediados del siglo XIX (citado por De Fina y Ravelo, 1973) observó diferencias en la manifestación de las fases fenológicas cuando las plantas se encontraban a diferentes amplitudes térmicas anuales.

De Fina y Ravelo (1973) indican que en ciruelo y manzano se requería menor cantidad de unidades calor para presentar un desarrollo normal fenológico cuando la amplitud era mayor; estos autores señalan que el éxito o fracaso de las introducciones de nuevos cultivos a una región depende en gran medida de las condiciones de amplitud térmica; citan de los inconvenientes que se tuvieron en ese sentido cuando se trataron de introducir trigos europeos en la pampa argentina.

Existen otros trabajos que explican algunas variaciones en el desarrollo de los cultivos debidos a la amplitud térmica, tales como el de Pascale y Damarico (1960) realizados para avena, cebada y centeno, Pascale y Da Mota (1966) para trigo, etc.

5.3 Índices agroclimáticos derivados de la temperatura

Uno de los principales factores climáticos limitantes en la producción de cultivos, es la temperatura. Tradicionalmente este elemento climático se ha manejado usando sus valores promedio, mensuales o anuales. Sin embargo, para fines agrícolas un promedio, ya sea mensual o anual no refleja la variación que se presenta a través del año, o durante el ciclo de un cultivo. Para que el uso de la temperatura tenga significado sobre el desarrollo de los cultivos, ésta tiene que expresarse en forma de parámetros agroclimáticos tales como: unidades de calor, unidades fototérmicas, unidades frío, etc. La determinación de estos parámetros, es básica en toda caracterización agroclimática.

Con la información histórica de temperatura de las estaciones climatológicas es posible estimar estos parámetros agroclimáticos. Conociendo la cantidad y distribución de unidades de calor, unidades de frío, etc. en una región, es posible determinar la adaptación y la probabilidad de éxito, tanto de especies anuales como de especies perennes, además de otras aplicaciones, como la predicción de etapas fenológicas en plantas e insectos.

5.3.1. Constante Térmica (Unidades Calor).

A) El Concepto de Unidades Calor.

La temperatura afecta al desarrollo de las plantas a través de su influencia sobre la velocidad de los procesos metabólicos. Temperaturas bajas retardan el desarrollo, mientras que altas temperaturas (hasta un cierto límite) lo aceleran y acortan el ciclo vegetativo de las plantas. Desde hace más de 2 siglos Réaumur (citado por De Fina y Ravelo, 1973) observó que las plantas necesitan de una cierta cantidad de calor para llegar a su madurez. Réaumur sumó las temperaturas medias diarias, excluyendo las inferiores a 0°C, y obtuvo la suma de temperaturas que requieren diversos cereales para alcanzar la madurez, a estas sumas (aparentemente fijas) se les dio el nombre de constante térmica.

Este concepto postula que el crecimiento y desarrollo de un cultivo dependen de la cantidad de calor que las plantas reciben. Esto quiere decir, que un cultivo alcanzará

una determinada etapa fenológica cuando haya recibido cierta cantidad de calor, independientemente del tiempo requerido para ello (Hodges y Doraiswany, 1979).

Posteriormente se fue apreciando que la constante térmica no era en todos los años la misma y que además variaba de un lugar a otro, al surgir dudas acerca de la validez de este parámetro como la había ideado Réamur, se conservó la idea de que las plantas debían requerir cierta cantidad de calor para alcanzar su madurez; por lo que se pensó en idear los métodos residual, exponencial y termofisiológico.

El concepto de unidades de calor, no obstante su falta de bases teóricas firmes, ha sido ampliamente usado para propósitos de planeación y operación agrícolas, ya que su cálculo y aplicación es muy fácil. El éxito de este concepto depende de la estrecha relación que existe entre temperatura y radiación solar, temperatura y fotoperíodo, y la adaptación de variedades a fotoperíodos locales (Hodges y Doraiswany, 1979).

B) Clasificación de los Índices para Calcular Unidades de Calor.

Los índices para calcular unidades de calor pueden agruparse dentro de las categorías básicas siguientes:

1. Exponencial.

El índice de exponencial supone que para un incremento de 10°C en la temperatura, la tasa de crecimiento se duplica. Este método tiene la deficiencia de que asigna una alta eficiencia para crecimiento óptimo a temperaturas muy altas, lo cual puede no ser correcto. La fórmula para calcular unidades de calor por este método es la siguiente:

$$U.C. = \sum_{i=1}^n 2^{\frac{(T_i - 4.5)}{10}}$$

donde:

- U.C. = Unidades de Calor o constante térmica.
- T_i = Temperatura media diaria.
- 4.5 = Temperatura mínima para el crecimiento.

Ejemplo:

$$T_i = 20^{\circ}\text{C} \quad \text{U.C.} = 2 \frac{(20-4.4)}{10} = 2.93$$

$$T_i = 30^{\circ}\text{C} \quad \text{U.C.} = 2 \frac{(30-4.4)}{10} = 5.86$$

$$T_i = 40^{\circ}\text{C} \quad \text{U.C.} = 2 \frac{(40-4.4)}{10} = 11.71$$

2. Fisiológico.

Este tipo de índice está basado en la respuesta fisiológica de las plantas a la temperatura. Estos índices han sido desarrollados tanto bajo condiciones controladas en cámaras de crecimiento, como bajo condiciones de campo. Para maíz bajo condiciones de campo se determinó el siguiente (Brown, 1976):

$$\text{U.C.} = (Y \text{ max.} + Y \text{ min.})/2$$

donde:

$$Y \text{ max} = 1.85 (T. \text{ max} - 10) - 0.026 (T. \text{ max} - 10)^2$$

$$Y \text{ min} = T \text{ min} - 4.4$$

Ejemplo:

$$T \text{ max} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$T \text{ min} = 16^{\circ}\text{C}$$

$$Y \text{ max} = 1.85 (30-10) - 0.026 (30-10)^2$$

$$= 1.85 (20) - 0.026 (20)^2$$

$$= 26.60$$

$$Y \text{ min} = 16 - 4.4$$

$$= 11.60$$

$$\text{U.C.} = (26.60 + 11.60)/2$$

$$= 19.10$$

3. Residual.

El índice residual acumula unidades calor arriba de una cierta temperatura base. Para calcular unidades calor por este método, se emplea la siguiente fórmula básica:

$$U.C. = \frac{T \text{ max} + T \text{ min}}{2} - T \text{ base}$$

donde:

T max = T máxima diaria
 T min = T mínima diaria
 T base = Temp. base

Existen diferentes versiones para calcular U.C. usando el índice residual. Algunas de éstas, las cuales han sido propuestas para maíz se mencionan a continuación.

$$a) U.C. = \frac{T \text{ max} + T \text{ min}}{2} - 10$$

Ejemplo:

$$\begin{aligned} T \text{ max} &= 28^{\circ}\text{C} \\ T \text{ min} &= 6^{\circ}\text{C} \\ U.C. &= \frac{28 + 6}{2} - 10 \\ U.C. &= 7 \end{aligned}$$

$$b) U.C. = \frac{T \text{ max} + T \text{ min}}{2} - 10$$

$$\begin{aligned} \text{Si: } T \text{ max} &> 30^{\circ}\text{C} = 30^{\circ}\text{C} \\ T \text{ min} &< 10^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Ejemplo:

$$\begin{aligned} T \text{ max} &= 34^{\circ}\text{C} \\ T \text{ min} &= 20^{\circ}\text{C} \\ U.C. &= \frac{30 + 20}{2} - 10 \\ U.C. &= 15 \end{aligned}$$

c) En climas cálido-secos se propuso la siguiente modificación a la fórmula inicial:

Si T media diaria > 24°C y la T max es > 32°C restar de las unidades calor acumuladas para ese día, la cantidad de grados centígrados que excedan del límite de 32°C. Con esta

$$U.C. = \frac{T \text{ max} + T \text{ min}}{2} - T \text{ base}$$

donde:

T max = T máxima diaria
 T min = T mínima diaria
 T base = Temp. base

Existen diferentes versiones para calcular U.C. usando el índice residual. Algunas de éstas, las cuales han sido propuestas para maíz se mencionan a continuación.

$$a) U.C. = \frac{T \text{ max} + T \text{ min}}{2} - 10$$

Ejemplo:

$$\begin{aligned} T \text{ max} &= 28^{\circ}\text{C} \\ T \text{ min} &= 6^{\circ}\text{C} \\ U.C. &= \frac{28 + 6}{2} - 10 \\ U.C. &= 7 \end{aligned}$$

$$b) U.C. = \frac{T \text{ max} + T \text{ min}}{2} - 10$$

$$\begin{aligned} \text{Si: } T \text{ max} &> 30^{\circ}\text{C} = 30^{\circ}\text{C} \\ T \text{ min} &< 10^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Ejemplo:

$$\begin{aligned} T \text{ max} &= 34^{\circ}\text{C} \\ T \text{ min} &= 20^{\circ}\text{C} \\ U.C. &= \frac{30 + 20}{2} - 10 \\ U.C. &= 15 \end{aligned}$$

c) En climas cálido-secos se propuso la siguiente modificación a la fórmula inicial:

Si T media diaria > 24°C y la T max es > 32°C restar de las unidades calor acumuladas para ese día, la cantidad de grados centígrados que excedan del límite de 32°C. Con esta

corrección se espera eliminar la acumulación excesiva de unidades de calor en climas cálido-secos.

Ejemplo:

$$\begin{aligned}
 T \text{ max} &= 38^{\circ}\text{C} \\
 T \text{ min} &= 26^{\circ}\text{C} \\
 T \text{ media} &= \frac{38 + 26}{2} = 32^{\circ}\text{C} \\
 \text{U.C.} &= \frac{38 + 26}{2} - 10 = 22 \\
 \text{U.C.} &= 22 - 6 = 16
 \end{aligned}$$

d) En climas templado-fríos (Valles Altos) se propuso también una corrección, la cual es con la finalidad de no subestimar las U.C. en estas regiones:

Si $T \text{ media}$ diaria $> 10^{\circ}\text{C}$ pero abajo de 15.6°C y la $T \text{ max} > 18.3^{\circ}\text{C}$ añadir a las unidades calor acumuladas para ese día la cantidad de grados centígrados que exceden de 18.3°C .

Ejemplo:

$$\begin{aligned}
 T \text{ max} &= 20^{\circ}\text{C} \\
 T \text{ min} &= 6^{\circ}\text{C} \\
 T \text{ base} &= 7^{\circ}\text{C} \\
 T \text{ media} &= \frac{20 + 6}{2} = 13^{\circ}\text{C} \\
 \text{U.C.} &= \frac{20 + 6}{2} - 7 = 6 \\
 \text{U.C.} &= 6 + 1.7 = 7.7
 \end{aligned}$$

c) Temperatura Base

Temperaturas Mínimas y Óptimas para Crecimiento y Desarrollo de Varios Cultivos.

El Cuadro 5.1 y 5.2 presenta los valores aproximados de temperatura mínima y temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo para varios cultivos. La acumulación de unidades de calor del límite de temperatura mínima al límite de temperatura óptima se asume que ocurre en forma lineal, aunque esto no es estrictamente cierto. Sin embargo, la aproximación lineal que se hace ha dado buenos resultados en la práctica. (Villalpando, 1984). En la figura 5.1 se muestra el rango de temperatura cardinal y letal.

Cuadro 5.1. Temperaturas aproximadas mínimas y óptimas para crecimiento y desarrollo de varios cultivos (Varios autores).

CULTIVO	T BASE MINIMA (°C)	T OPTIMA (°C)
Frutales Caducifolios	5	25
Trigo, cebada, avena	5	20 - 25
Maíz	10	30 - 32
Soy	10	30 - 32
Frijol	8 - 10	20 - 25
Arroz	15	20 - 30
Algodón	12 - 15	30 - 34
Girasol	10	25 - 30
Sorgo	15	30 - 35

4. Método termofisiológico.

Este método debiera ser el más utilizado pues se basa en experiencias termofisiológicas que se acercan más a la realidad, pero no sucede así dada la escasez de este tipo de experiencias.

La eficiencia de una temperatura se establece comparando la velocidad de crecimiento de la planta a dicha temperatura, respecto a la velocidad de la temperatura unitaria (4.5°C).

Por ejemplo, si a 30°C la eficiencia de la temperatura es de 120, esto quiere decir que a 30°C el crecimiento de la planta es 120 veces más rápido que a 4.5°C.

Si se gráfica la velocidad de crecimiento o índice termofisiológico contra las temperaturas registradas durante el experimento, se obtendría una curva que auxiliaría el cálculo de la constante térmica. Los datos también podrían ser tabulados para facilitar los cálculos.

Para calcular la constante térmica por este método, se entraría con la temperatura media diaria en la gráfica o tabla respectiva y se obtendría el índice termofisiológico correspondiente. La sumatoria de los índices daría la constante. Ver figura 5.2.

Cuadro 5.1.A. Temperaturas (°C) requeridas por los cultivos.

	Mfñima Letal	Mfñima Umbral	Optima	Máxima Umbral	Máxima Letal
HORTALIZAS					
Espárrago	0	10	24, 30	35	41
Frijol	3	15	18, 27	29	38
Repollo	0	4	10, 15	35	38
Zanahoria	-1	4	7, 29	35	--
Lechuga	0	2	4, 27	29	38
Melón	-1	15	25, 27	--	--
Cebolla	0	2	10, 32	35	38
Pimiento	--	15	29	35	--
Papa	<-2	-2	17	26	29
Remolacha Azucarera	--	-7	6, 7	--	--
Tomate	0	14	18, 24	27	--
Sandía	3	15	21, 35	41	--
FRUTALES					
Manzano	-34	-10, -12	11, 17	24	--
Vid	0	2, 4	20, 30	35, 40	--
Naranja	-2	13	23, 33	38	--
Durazno	-26	-1	18, 24	--	--
Nuez	-7	-1	--	38	--
CEREALES					
Cebada	-8	0	25, 31	37	--
Maíz	0.5	10	15, 35	41	42
Sorgo	-6	10	27, 29	44	49
Trigo	-9	5	25, 31	37	--
CULTIVOS DE FIBRA					
Algodón	-1	15	25, 30	35	>40

Tung, 1976.

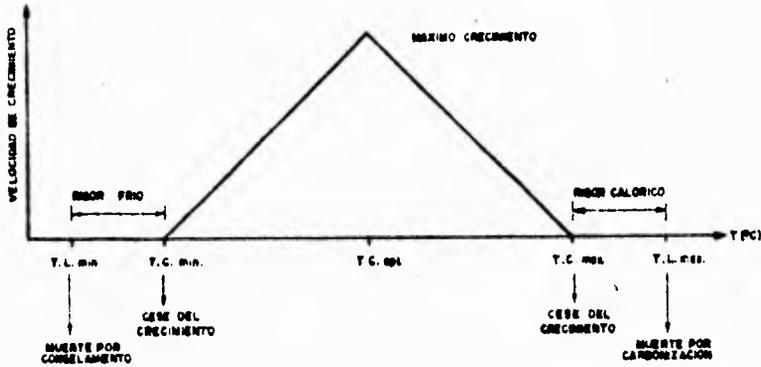


Figura 5.1 Temperaturas Cardinales (T.C.) y temperaturas Letales (T.L.) (Arteaga, 1978)

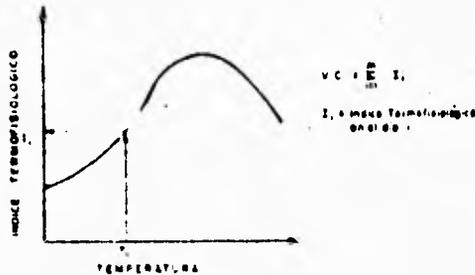


FIG. 5.2 Método Termofisiológico para Calcular la Constante Térmica. Arteaga (1978).

La experiencia básica de este método se hizo con plantitas de maíz recién nacidas, sometidas a obscuridad y a una temperatura uniforme durante 12 horas. Azzi publicó las tablas correspondientes en 1928 en su obra *Ecología Agraria*.

5. Método de los triángulos y de los trapecios.

Tanto el método de los triángulos como el de los trapecios son métodos gráficos que eliminan varias de las deficiencias de los anteriores métodos, sólo que son más laboriosos y requieren de termogramas, los cuales no siempre están disponibles.

En el método de los triángulos se mantiene únicamente la deficiencia de darle demasiado peso a las temperaturas

máximas y esa deficiencia se elimina al usar el método de los trapecios.

En estos métodos se pueden establecer diferentes valores del cero vital y temperatura cardinal óptima para diferentes lapsos de tiempo, de acuerdo a la etapa fenológica vigente. Las figuras 5.3 y 5.4 ilustran tales métodos.

6. Método de Thom.

Da Nota (1979) cita un método ideado por Thom en 1954, que tiene importancia más por su facilidad de cálculo que por la exactitud de sus resultados. Utiliza como datos principales la temperatura media mensual, la desviación de la media mensual y la temperatura base o cero vital correspondiente a la especie estudiada.

Si se dispone de los datos anteriores, con este método es posible obtener fácilmente una buena aproximación de la constante térmica.

El método utiliza la siguiente fórmula general:

$$U.C. = N ((\bar{T}_m - C.V.) + L \sigma \sqrt{N})$$

donde: U.C. = unidades calor acumuladas en el mes correspondiente.

N = número de días al mes.

\bar{T} = temperatura media mensual.

C.V. = cero vital o temperatura base.

σ = desviación estandard de la temperatura media mensual.

L = coeficiente de proporcionalidad.

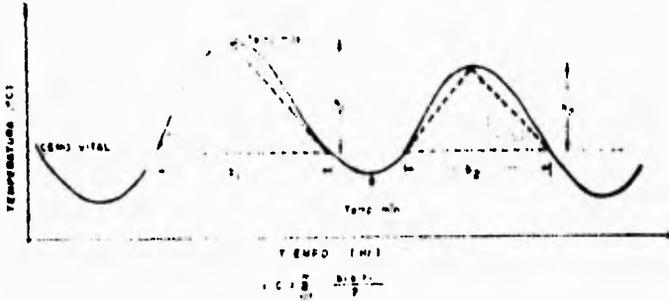


Fig. 5.3 Método de los Triángulos para Calcular la Constante Térmica. Arteaga (1978).

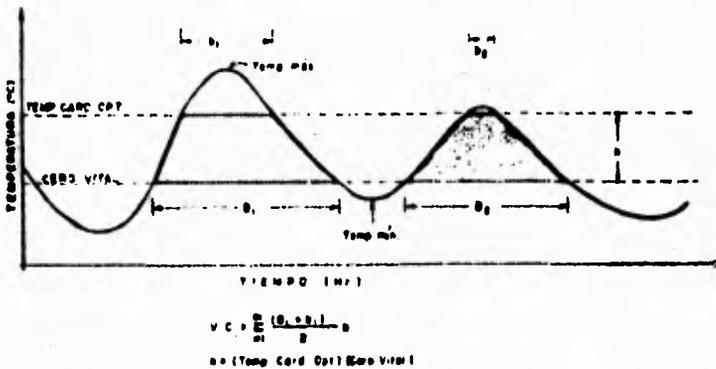


FIG. 5.4 Método de los Trapecios para Calcular la Constante Térmica. Arteaga (1978)

Para obtener L se entra con el argumento H a la cuadro 5.5. Esta tabla debe ser ajustada para cada región climática. El valor de H se obtiene con:

$$H = \frac{(\bar{T}_m - C.V.)}{\sigma N}$$

La utilidad que reporta el estudio y el cálculo de la constante térmica en el campo agrícola es muy amplia y variada, pero sin embargo, continua siendo un concepto relativamente poco aplicado.

Se le puede usar para los estudios de zonificación de cultivos; estableciendo fechas de siembra; predicción de épocas de cosecha; programación de labores culturales; como auxiliar para determinar calendarios de riego; en la medición y estudio de las etapas fenológicas; etc. Su utilidad más amplia se reporta en la zonificación de cultivos, ya que a través de su estudio se obtiene una premisa importante que amplía el criterio sobre qué tipo de cultivos y en qué lugares se deben establecer, de manera que se obtengan los más altos rendimientos.

8. Termoperiodismo.

El término "termoperiodismo" es usado para referirse a la respuesta que presentan las plantas a los cambios cíclicos de la temperatura ambiental.

La temperatura es uno de los elementos meteorológicos característicamente cíclicos, por lo tanto, es común referir el estudio de su variación por medio de termoperiodos anuales, diarios o irregulares según si la variación estudiada comprende ciclos completos de un año, un día o varios días.

Por lo anterior, también se puede definir el termoperiodismo como la respuesta de las plantas al termoperiodo.

Sin excepción, todos los termoperiodos presentan dos termofases, una positiva o sea la más cálida y otra negativa o sea la más fría. Ver figura 5.5.

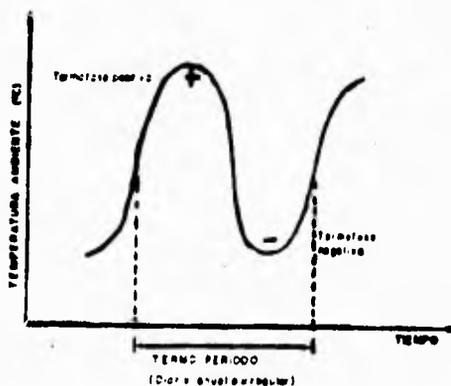


Figura 5.5 Termofases. (De Fina, s/f).

Cuadro 5.5 Valores de H y L para el Cálculo de la Constante Térmica por el Método de Thom. Da Mota (1979).

H	L	H	L	H	L	H	L
-0.70	0.70	-0.32	0.39	0.05	0.17	0.42	0.05
-0.69	0.70	-0.31	0.38	0.06	0.17	0.43	0.05
-0.68	0.69	-0.30	0.38	0.07	0.16	0.44	0.04
-0.67	0.68	-0.29	0.37	0.08	0.16	0.45	0.04
-0.66	0.67	-0.28	0.36	0.09	0.15	0.46	0.04
-0.65	0.65	-0.27	0.36	0.10	0.15	0.47	0.04
-0.64	0.65	-0.26	0.35	0.11	0.14	0.48	0.04
-0.63	0.64	-0.25	0.34	0.12	0.14	0.49	0.03
-0.62	0.63	-0.24	0.34	0.13	0.13	0.50	0.03
-0.61	0.62	-0.23	0.33	0.14	0.13	0.51	0.03
-0.60	0.61	-0.22	0.32	0.15	0.13	0.52	0.03
-0.59	0.60	-0.21	0.32	0.16	0.12	0.53	0.03
-0.58	0.59	-0.20	0.31	0.17	0.12	0.54	0.03
-0.57	0.58	-0.19	0.30	0.18	0.11	0.55	0.03
-0.56	0.59	-0.19	0.30	0.19	0.11	0.56	0.02
-0.55	0.57	-0.17	0.29	0.20	0.11	0.57	0.02
-0.54	0.56	-0.16	0.29	0.21	0.10	0.58	0.02
-0.53	0.55	-0.15	0.29	0.22	0.10	0.59	0.02
-0.52	0.54	-0.14	0.27	0.23	0.10	0.60	0.02
-0.51	0.53	-0.13	0.27	0.24	0.09	0.61	0.02
-0.50	0.53	-0.12	0.26	0.25	0.09	0.62	0.02
-0.49	0.52	-0.11	0.25	0.26	0.09	0.63	0.02
-0.48	0.51	-0.10	0.25	0.27	0.08	0.64	0.02
-0.47	0.50	-0.09	0.24	0.28	0.08	0.65	0.01
-0.46	0.50	-0.08	0.24	0.29	0.08	0.66	0.01
-0.45	0.49	-0.07	0.23	0.30	0.07	0.67	0.01
-0.44	0.48	-0.06	0.23	0.31	0.07	0.68	0.01
-0.43	0.47	-0.05	0.22	0.32	0.07	0.69	0.01
-0.42	0.47	-0.04	0.22	0.33	0.07	0.70	0.01
-0.41	0.46	-0.03	0.21	0.34	0.06	0.71	0.01
-0.40	0.45	-0.02	0.20	0.35	0.06	0.72	0.01
-0.39	0.44	-0.01	0.20	0.36	0.06	0.73	0.01
-0.38	0.44	0.00	0.19	0.37	0.06	0.74	0.01
-0.37	0.43	0.01	0.19	0.38	0.06	0.75	0.01
-0.36	0.42	0.02	0.18	0.39	0.05	0.76	0.01
-0.35	0.41	0.03	0.18	0.40	0.05	0.77	0.01
-0.34	0.41	0.04	0.17	0.41	0.05	0.78	0.00
-0.33	0.40						

Para $H < -0.70$, $L = H$ Para $H > 0.78$, $L = 0.0$

El estudio conjunto de ambas termofases señala las reacciones de los cultivos a la marcha temporal de la temperatura, tanto en su crecimiento como en su desarrollo.

En el caso de considerar la marcha anual, es evidente su relación con el desarrollo de los cultivos y por lo tanto, con su distribución geográfica. Según la respuesta de los cultivos al termoperíodo anual, estos se clasifican en "Termocíclicos", "Paratermocíclicos" y Atermocíclicos". Los primeros son aquellos que presentan tejidos activos durante uno o más años, es decir, los cultivos perennes. Estos a su

vez pueden ser criófilos o termófilos, según si tienen importantes requerimientos de bajas temperaturas o no, por ejemplo, el manzano, el ciruelo y durazno son perennes criófilos y en cambio el cacao, el cocotero y el caucho son perennes termófilos. Obviamente, también los cultivos bianuales, están clasificados como cultivos termocíclicos.

Los cultivos paratermocíclicos son las especies anuales que presentan tejidos activos en porciones de las termofases positiva y negativa. Es el caso de los cultivos llamados de invierno, como el trigo, la avena y la cebada.

Aquellos cultivos que sólo presentan tejidos activos durante la termofase positiva del termoperíodo anual son, finalmente, los atermocíclicos. Por ejemplo, maíz, tomate, sorgo, frijol, chile, etc. La figura 5.6 ilustra lo anterior.

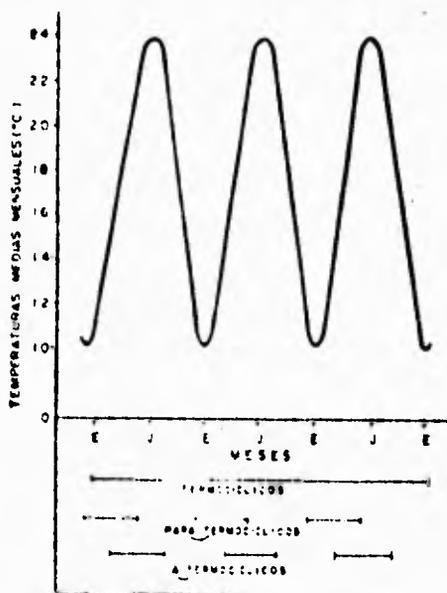


Figura 5.6 Marcha anual de la temperatura del aire y clasificación de los cultivos según su termoperíodo anual. (De Fina, s/f)

El termoperíodo diario, por su parte, acusa efectos de importancia en los cultivos paratermocíclicos y atermocíclicos, más no así en los termocíclicos en los que se le considera como una interferencia dentro del termoperíodo anual.

Está probada la influencia de la variación diaria de la temperatura en la floración y fructificación de ciertas especies anuales. Por ejemplo, sin termofase negativa, representada por las temperaturas nocturnas, el Tomate presenta crecimiento indefinido pero no florece ni fructifica. En cultivos invernales, la termofase negativa es necesaria para un desarrollo normal.

Los termoperíodos irregulares son causados por la advección anormal de masas de aire polar o tropical y la respuesta de los cultivos, en general, son adaptaciones deficientes a las condiciones climáticas manifestadas en bajas brotaciones, floraciones prematuras, escasa fructificación, rendimientos bajos, etc. La termoperiodicidad irregular se considera comúnmente como una interferencia al termoperíodo anual y/o diario, aunque también puede actuar por sí sola.

5.3.2 Unidades fototérmicas.

A. El Concepto de Unidades Fototérmicas.

El concepto de unidades calor supone que el fotoperíodo no afecta la tasa de desarrollo de las plantas. Sin embargo, para ciertas especies o variedades de una misma especie, se han observado efectos muy marcados por fotoperíodo durante ciertas etapas de desarrollo (Hodges y Doraiswamy, 1979). Para cuantificar la interacción de temperatura y fotoperíodo sobre el desarrollo de las plantas, el concepto de unidades calor se ajustó combinándose con la longitud del día. De esta manera se obtuvieron los índices heliotérmicos o unidades fototérmicas.

Los efectos de las bajas temperaturas no siempre son negativos; ciertas especies como los cereales de invierno y los frutales de hoja caduca, requiere de acumular una cierta cantidad de bajas temperaturas en cierto período de su vida, para poder continuar su desarrollo posterior sin ninguna anomalía fenológica o sin mermas en su rendimiento.

En los lugares donde las temperaturas mínimas del invierno son demasiado elevadas o existe una alta frecuencia de años con la insuficiente acción de enfriamiento, el cultivo de las especies mencionadas se encuentra restringido o simplemente no existe.

B. Cálculo de Unidades Fototérmicas.

El cálculo de unidades fototérmicas se hace mediante la siguiente fórmula básica:

$$\text{UFT} = \frac{\text{U.C.} \times \text{F}}{10}$$

donde:

UFT = Unidades Fototérmicas
 U.C. = Unidades Calor
 F = Fotoperiodo (duración del día)

Ejemplo:

Supongamos los siguientes datos para calcular las unidades fototérmicas disponibles para el cultivo de soya:

Latitud = 20° 00nN
 Fecha = 17 de Junio
 Fotoperiodo = 13h 20n (13.33)
 T max = 30°C
 T min = 12°C

Primero se calculan las unidades de calor, se usará en este ejemplo la fórmula siguiente:

$$\text{U.C.} = \frac{\text{T max} + \text{T min}}{2} - 10 = \frac{30 + 12}{2} - 10 = 11$$

$$\text{UFT} = \frac{\text{U.C.} \times \text{F}}{10} = \frac{11 \times 13.33}{10} = 14.66$$

Índice Heliotérmico de Geslin.

El conocimiento de la interacción de la temperatura y la duración del día sobre el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales es relativamente reciente. La constante térmica se ve afectada por el fotoperiodo y entonces se tienen diferentes "constantes" térmicas para diferentes duraciones del día, por ejemplo, la constante térmica disminuye al aumentar la duración del día.

Las plantas, para su crecimiento y desarrollo presentan pues, exigencias combinadas de temperatura y fotoperiodo, es decir, presentan necesidades heliotérmicas o fototérmicas, así, si el fotoperiodo permite la floración de una planta,

ésta sólo se producirá si la planta ha recibido una suma determinada de temperaturas y al revés, osea, si la planta ha recibido la suficiente cantidad de temperaturas la floración sólo se producirá si también se cumplen las exigencias de fotoperíodo.

Diversos experimentos llevaron a la conclusión de que las exigencias heliotérmicas de las plantas se presentaban constantes según la especie, y aún más, según la variedad. Geslin en 1944, concretizó la idea anterior en base a una serie de experimentos de siembras escalonadas de trigo e ideó un método para calcular dicha constante heliotérmica que hoy se conoce como índice heliotérmico de Geslin. De Fina (1945) aclara que dicho índice permanece razonablemente constante para una cierta variedad, siempre que las siembras hayan sido hechas en la época "normal" correspondiente a la variedad estudiada, ya que por la metodología de cálculo no se puede distinguir si durante el ciclo vegetativo el fotoperíodo va disminuyendo o aumentando.

El índice Heliotérmico de Geslin se calcula con la siguiente fórmula:

$$I.H. = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{D}_n}{100} ; \quad \bar{D}_n = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{T}_i}{100}$$

Donde:

I.H. = Índice Heliotérmico de Geslin

\bar{T}_i = Temperatura media diaria en el día i (°C)

n = Número de días del ciclo vegetativo o etapa fenológica estudiada.

\bar{D}_n = Duración media del fotoperíodo en el lapso n considerado (Hr)

D_i = Duración del fotoperíodo en el día i (Hr),

La fórmula da centésimas de los valores reales, pero así se ha venido manejando por comodidad.

El índice heliotérmico de Geslin es un índice bioclimático que marca la influencia combinada de la temperatura y el fotoperíodo sobre los cultivos, pero seguramente tendrán que incluirse nuevas consideraciones acerca de la influencia del contenido de humedad del suelo, que puede modificar el uso de los índices bioclimáticos o las relaciones entre otros elementos bioclimáticos y el rendimiento..

5.3.3 Horas frío.

La acción que ejercen las bajas temperaturas en los cultivos no es siempre perjudicial debido a que las plantas invernales y las perennes caducifolias requieren de un período de enfriamiento o vernalización. Este período de frío es necesario para cumplir posteriormente su desarrollo sin anomalías fenológicas ni alteraciones en el rendimiento. Los niveles térmicos debajo de los cuales se considera que los vegetales empiezan a acumular el efecto vernalizante varía dependiendo de la especie, variedad y año. Sin embargo, se ha generalizado el uso de las temperaturas de 0 a 5°C para cereales invernales, y de 6 a 7°C para frutales que necesitan frío (Swets y Zeitlinger, 1975).

El período de dormancia (vernalización, descanso invernal) puede ser estimado mediante los siguientes métodos:

A. Horas Frío.

El método de horas frío acumuladas abajo de 7.0°C (45°F) ha sido uno de los más usados para estimar los requerimientos de frío en frutales caducifolios. La literatura reporta varios procedimientos para calcular o estimar el número de horas frío acumuladas durante el período invernal. Entre los más usados se presentan los siguientes:

Métodos Directos.

1. Método del Huerto Fenológico.

Es el único método con el que se puede llegar a determinar con precisión la cantidad de horas frío que aporta un lugar determinado. Hacer extensivo su uso sería muy costoso y los resultados serían a largo plazo, sin embargo, con fines didácticos y de investigación sí se justificaría su realización.

Consiste en el establecimiento de un huerto con observaciones meteorológicas y fenológicas, que cuenten con una serie de especies y variedades, de requerimiento conocido y con un rango de necesidades en frío lo suficientemente amplio, escalonado preferentemente cada 50 horas-frío y en donde el número de horas-frío con que cuenta el lugar estén comprendidas y más o menos centralizadas.

En el país son muy escasos los huertos fenológicos con estas características.

2. Método del Termógrafo.

Para calcular el número de horas frío por este método, simplemente se traza una línea sobre el termograma (Carta de registro continuo del termógrafo o higrotermógrafo) a la altura del valor de 7°C. Después de esto, se cuentan el número de horas por abajo de 7°C para el período que cubra el termograma (generalmente son semanales). (Ver figura 5.7)

Sus resultados en general, arrojan datos sobreelevados ya que no toma en cuenta las condiciones que contrarretan el efecto del frío, además de que son modificados por la ubicación del termógrafo dentro del huerto, su precisión y por su calibración. Se recomienda, por lo tanto, usar con las debidas reservas este método.

Métodos Indirectos.

Como no siempre se dispone de termógrafo para calcular las horas frío se han ideado una serie de métodos, en diversas latitudes, básicamente a partir de la relación del comportamiento de la temperatura con el número de horas frío de alguna manera inferido. Al uso del termógrafo para éste cálculo se le conoce como método directo, mientras que a los métodos de relación se les denomina indirectos y se pueden clasificar en métodos de cálculo diario y métodos de cálculo mensual.

1. Método de Crossa-Raynaud.

De los primeros el más conocido en nuestro medio es el de Crossa-Raynaud, cuya fórmula es la siguiente:

$$H_f = \frac{7 - m}{M - m} \times 24$$

donde:

Hf = horas frío diario
 M = temperatura máxima diaria
 m = temperatura mínima diaria

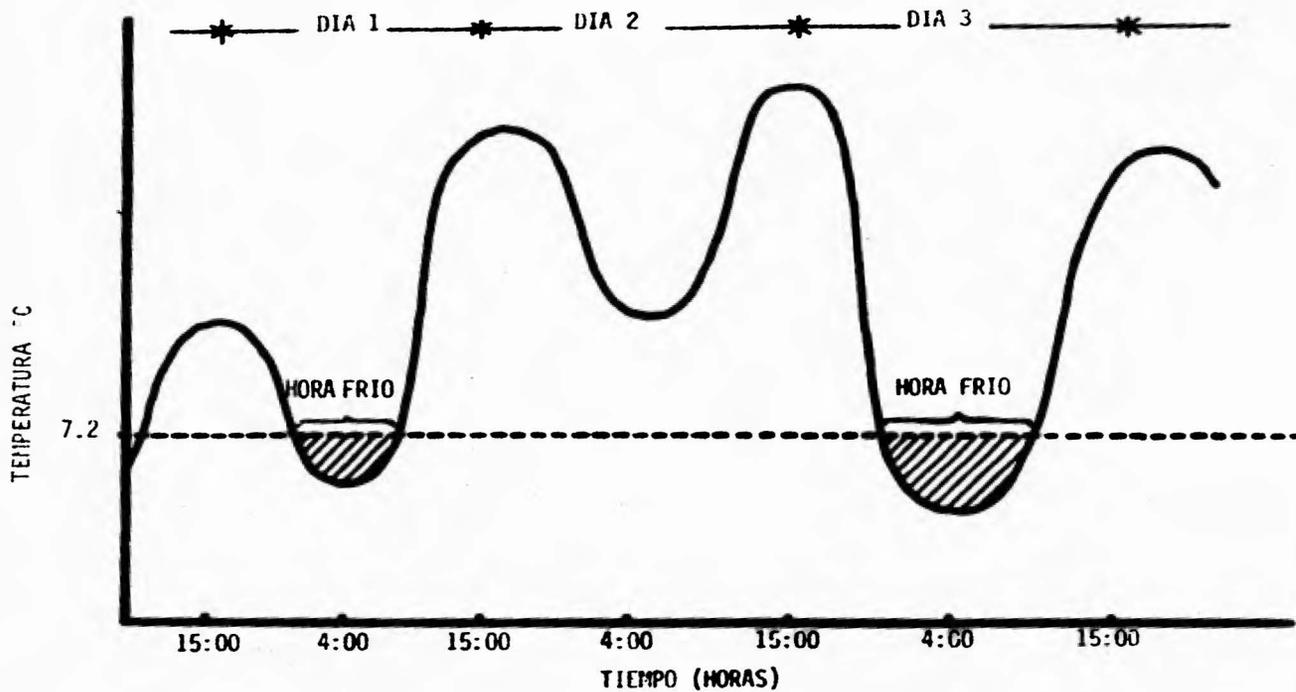


Figura 8.7 Acumulación de frío registrada por el método convencional en termógrafo, con base en la suma diaria de horas en que se presentan 7.2 °C o menor. (Díaz M. 1987).

2. Método de F. S. Da Mota

Las horas frío también pueden ser calculadas en forma aproximada utilizando las temperaturas medias mensuales de los meses invernales. Da Mota (1979) desarrolló un método que utiliza la temperatura media mensual de noviembre, diciembre, enero y febrero para calcular las horas frío acumuladas mensualmente. La fórmula desarrollada por éste autor es la siguiente:

$$H_f = 485.1 - 28.52 T_m$$

donde:

H_f = Horas frío mensuales
 T_m = Temperatura media mensual (°C)

Ejemplo:

Estimación de las horas frío promedio disponibles en Toluca, Méx. para el periodo de noviembre a febrero.

<u>MES</u>	<u>TEMP. MEDIA</u>
Nov.	11.21°C
Dic.	10.07°C
Ene.	9.72°C
Feb.	10.16°C

$$\begin{aligned} H_f &= 485.1 - 28.52 T_m \\ &= 485.1 - 28.52 (11.21) = 165.4 \\ &= 485.1 - 28.52 (10.07) = 197.9 \\ &= 485.1 - 28.52 (9.72) = 207.9 \\ &= 485.1 - 28.52 (10.96) = 172.5 \end{aligned}$$

$$H_f = \underline{743.7}$$

En el método de Da Mota se ha encontrado que en algunas regiones de México tiende a subestimar la disponibilidad de horas frío, cuando se ha comparado con las horas frío calculadas usando temperaturas horarias. Una causa posible de ésta diferencia puede ser debido a que los datos utilizados en el desarrollo del modelo provienen de otra latitud y regiones climáticas distintas a las encontradas en México. La Tabla 2A del anexo facilita éste cálculo.

3. Método de Weinberger

Una estimación de las horas bajo 7°C en relación a las temperaturas medias de los meses de diciembre y enero fue desarrollada por J.H. Weinberger (1967). La Tabla 3A del anexo se utiliza para este objetivo.

4. Hinojosa (1979), propone la siguiente ecuación:

$$H_f = -33.008 \bar{T}_m + 638.95$$

$$\text{con } R^2 = 0.9937$$

Donde:

H_f= Horas frío en el mes

\bar{T}_m = Temperatura media mensual en los meses de invierno.

Sea cual fuere el método utilizado, es necesario analizar información climatológica cuando menos de los últimos cinco años y preferentemente diez.

5. Muñoz Santamaría (en Calderón, 1983), citado por Gómez, (1989), estableció una tabla donde señala para la temperatura media de diciembre y enero la cantidad de horas frío acumuladas, que ha sido seguido por el propio Calderón y Reyna. Ambos consideran que la mejor forma para conocer las horas frío en la República Mexicana es obtener el valor según el método de Da Mota y promediario con Weinberger; esto es un error científico, pues aunque ambos métodos arrojen resultados muy semejantes, algo anda mal cuando uno de ellos trabaja con cuatro meses y el otro con dos y se obtiene resultados semejantes.

Calderón (op.cit.) en base a las experiencias de Muñoz Santamaría señala: " Que los métodos de Da Mota y Weinberger, especialmente el primero, son los que proporcionan la estimación más cercana a la realidad (sic) de efecto del frío sobre los árboles en un lugar dado. El uso de éstos métodos se recomienda para el cálculo de horas frío en aquellos lugares subtropicales de altura en que se cuente con datos de temperaturas medias de los meses de invierno..."

6. Otro método conocido pero menos empleado es el de el estadounidense Sharpe , también correlativo y mensual, quien establece una tabla entre temperaturas media mensual y horas frío, que se da a continuación en el cuadro 5.3.

El inconveniente de este método, como se apreciará más adelante, es que arroja valores demasiado altos respecto a la realidad.

Cuadro 5.3 Método de horas frío de Sharpe.

Temperatura media mensual en °C	Horas frío acumuladas en el mes.
7.8	395
8.9	353
10.0	311
11.1	270
12.2	230
13.3	190
14.4	152
15.6	115
16.7	79
17.8	47
18.9	23
20.0	0

Fuente: Gómez, 1989.

7. Gómez y Morales (1984) realizaron un análisis de los diversos métodos de cálculo de horas frío en función a apreciar de que los diversos métodos indirectos aplicados en una misma localidad y en un mismo período solían arrojar resultados diferentes, lo cual llevó a pensar que: había un método más apegado a la realidad o bien todos diferían de ella.

El cálculo de horas-frío por métodos indirectos tiene, por lo general, normas comunes como son: el hecho de considerar hora-frío, toda temperatura igual o debajo de 7.2°C y contabilizarlas de noviembre a febrero. Se pensó en idear un método más efectivo, una primera idea para esto surgió al elaborar gráficas, a semejanza de las del termógrafo, donde se colocaron las temperaturas máxima, mínima y ambiente diarias y luego se unieron con líneas. A continuación se contabilizaron las horas frío de esta manera y se vio que la diferencia era mínima; a esta forma de calcular las horas frío se les denominó semidirecta, sin embargo, por ser un trabajo muy laborioso se pensó en matematizar el modelo de lo que sugirieron las fórmulas siguientes:

$$\begin{array}{l}
 \text{Si} \\
 \text{H.F.} = 17 + \frac{17 \text{ TMA} - 119}{\text{tm} - \text{TMA}} - \frac{\text{Tm} - 7}{\text{TA} - \text{tm}} \\
 \\
 \text{Si} \\
 \text{H.F.} = 1 + \frac{42 - 6\text{TA}}{\text{TM} - \text{TA}} - \frac{17\text{tm} - 119}{\text{TMA} - \text{tm}}
 \end{array}$$

donde:

Hf = horas frío
 TMA = temperatura máxima del día anterior
 TM = temperatura máxima
 TA = temperatura ambiente a las 8 a.m.
 Tm = temperatura mínima

Los valores numéricos son constantes.

Los resultados obtenidos deben tomarse en su valor absoluto, y aplicación más práctica puede disponerse de una calculadora programable o bien una computadora.

Los resultados de la aplicación de diversos métodos, con once años fueron los siguientes (cuadro 5.4):

Cuadro 5.4. Comparación de los diversos métodos de cálculo de horas frío para Ciudad Universitaria, D.F. (Gómez, 1989).

Método	Resultado promedio en horas-frío	Porcentaje de error respecto al termógrafo
Directo	590	0%
Gómez-Morales	526	10.9%
Da Mota	467	21.4%
Crossa-Raynaud	471	20.2%
Sharpe	784	32.9%

Los autores de este método dicen que " de los 11 años mostrados respecto a Crossa-Raynaud, el método Gómez-Morales estuvo más próximo a la realidad y Da Mota solamente una vez fue más efectivo que el resto, lo que indica que Da Mota puede oscilar en sus resultados de un año a otro y dar un promedio "engañoso" con fines de planeación frutícola".

Gómez , (1989) aclara: " Ahora bien, si cada método ha sido probado y aprobado en su lugar de origen, ello está indicando que el comportamiento de los caducifolios,

independientemente de los elementos de cálculo que se han convertido en "convencionales", responde a una serie de factores ambientales conjuntos, donde como señalan Garcidueñas y Rovalo (1985) la termofase negativa y la duración de la luz jueguen un papel primordial, de tal suerte que los métodos directos e indirectos tan sólo reflejan un elemento; el térmico que tiene que ver con la dormancia pero no dan razón del proceso bioquímico que se lleva a cabo en las plantas, como señalan los mismos autores: "En realidad el periodo de frío... no induce directamente a la floración, pero si es determinante para que ocurran cambios fisiológicos que llevan al desarrollo de la floración".

Requerimientos de Frío en los Vegetales.

Gómez R (1991) menciona una hipótesis que relaciona los aspectos físicos (temperatura y luz) con los fisiológicos indica que al irse acortando los días durante el otoño la cantidad de hormonas tales como las auxinas y gibarelinas, y quizá otras como la vernalina o florígeno van disminuyendo, mientras que el nivel de hormonas inhibitoras, abscisina y compuestos fenológicos, probablemente, van en aumento. (Figura 5.9 y 5.10). Durante los meses fríos la planta va metabolizando los inhibidores, para posteriormente, después del 21 de diciembre, al volverse a alargar los días comienza la síntesis de hormonas estimulantes hasta que al romperse el equilibrio inhibidores-estimulantes, en favor de éstos últimos, comenzará el desarrollo de las yemas al que ayuda, por supuesto, la temperatura cada vez más alta al terminar las horas frío. Esto se podría representar según la Figura 5.8.

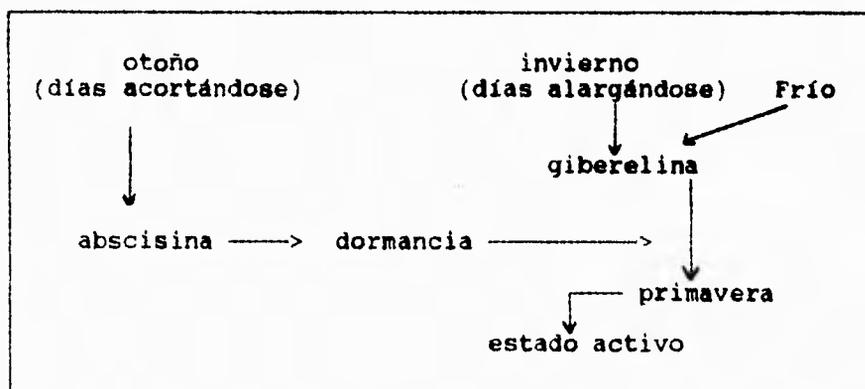


Figura 5.8. Relaciones físico-químicas en los caducifolios. (Basado en Garcidueñas-Rovalo y modificado por Gómez, 1989).

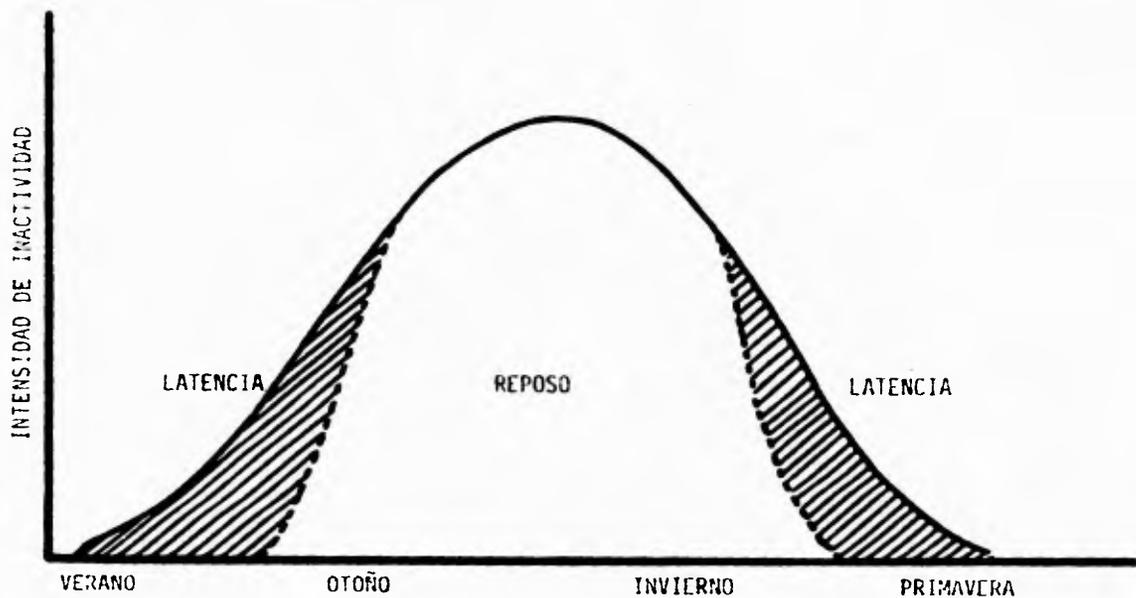


Figura 5.9 Etapas de inactividad de crecimiento en árboles frutales del tipo templado, reguladas por condiciones externas (latencia) o internas (reposo). (Díaz M. 1987).

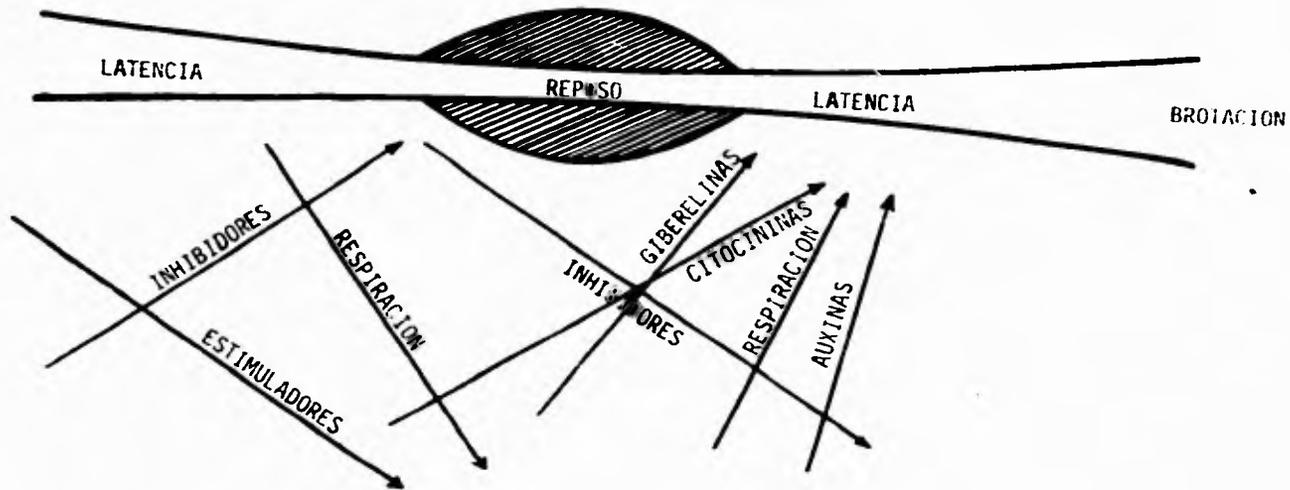


Figura 5.10 Descripción esquemática de los cambios en respiración y hormonales, en relación al reposo. Lavee, 1973. (Díaz M. 1987).

Siguiendo ésta línea de investigación los propios Garcidueñas y Rovalo (ibid) indican que "ésta explicación está de acuerdo con lo observado en muchos frutales, los cuales, si el invierno es siempre frío, satisfacen su requerimiento termoperiódico con menos horas frío que cuando el invierno alterna días fríos y cálidos, pues en éstos las hormonas termolábiles serían destruidas con lo que bajaría su nivel y tomaría más horas de frío volver a elevarlo".

Gómez (1989), considera " y seguramente otros investigadores también este dato está basado en el comportamiento del durazno y de ahí se extrapoló a las demás especies y variedades que requieren frío otoño-invierno, de ahí que esta cifra es meramente convencional y no necesariamente todas las variedades comienzan el estímulo por frío a esta temperatura, hipotéticamente puede ser por encima o por debajo de ese valor, que no necesariamente la caída de las hojas, que señala la presencia del frío en las plantas, se realiza bajo esas dos condiciones, ni en México, ni en otras partes del mundo, incluso de latitudes altas. Luego, tal parece que el conteo de necesidades de frío se ha realizado para todas las variedades a partir de los 7°C y la bibliografía corriente pública tablas de horas frío por variedad".

Parece también que dichos valores se obtienen observando el comportamiento fenológico de los árboles desde la caída de las hojas hasta la reactivación de las yemas foliares y florales, considerando que dicho proceso se da de principios de noviembre a finales de febrero, debe ser el termógrafo el que vaya registrando las horas frío, y entonces, supuestamente, las horas frío se llevan a cabo de noviembre a febrero en todas las localidades donde se dan los caducifolios invernales; esto quizá sea lo normal en la mayoría de los lugares donde se presenta el fenómeno en Estados Unidos y Europa y se ha convenido nuevamente en establecer el cálculo convencionalmente a todo el mundo, lo cual puede ser un grave error. Gómez Rojas tiene pleno conocimiento de que en la cuenca de México y en las partes altas del noroeste de Morelos esto no sucede así.

Esto es muy probablemente lo que suceda en las partes altas subtropicales del territorio nacional, o sea, el centro de México, donde se encuentran noches frías con días cálidos, cuyas temperaturas rebasan los 20°C, lo que indicaría una pérdida de horas-frío, ya que según Da Mota sobre los 18°C de temperatura ya no pueden conservarse las horas-frío, o según Sharpe a los 20°C.

De tal manera, que quizás no importe que se estén calculando con buena exactitud las horas-frío, si éstas van disminuyendo en la planta por la alta oscilación térmica, y aunque se este calculando un fenómeno físico, con algún método indirecto, que es la temperatura, no se está haciendo

lo adecuado con lo termofisiológico, de tal manera que existe la necesidad de profundizar en estudios botánico-fisiológicos. (Figura 5.11).

Gómez, (1989) concluye "Así, el estudio de las horas-frío en nuestro medio deberá comprender, amén de los aspectos estrictamente fenológicos, la acción de la oscilación térmica diaria, el estudio de las horas frío y la acción de la luz, recordando que la agroclimatología es el estudio, observación y análisis de relaciones físicas y biológicas simultáneamente.

5.3.4 Horas sobre 18°C.

De acuerdo con los resultados de Erez y Lavee en 1971 y Erez et al en 1979 (mencionado por del Real, 1982) se considera negativa la acción de las temperaturas sobre 18°C. Para calcular el número de horas transcurridas en este rango se desarrolló la Tabla 4A del anexo. Se puede cuantificar con ella la acumulación de horas sobre este umbral para un período diario, semanal y mensual. Se utilizan para calcular horas frío ajustadas asignándoseles valores negativos de -1 ó -2 y restándose su reserva de la acumulación de horas bajo 7°C. Para los frutales se utilizan los datos diarios de los meses de noviembre a febrero.

5.3.5 Unidades Frío

Una limitante del método de horas frío acumuladas abajo de 7.0°C, es que el número de horas frío requeridas por una especie frutal para completar el período de descanso, es muy variable en años extremos (inviernos muy tibios, o bien muy fríos). Esto es debido a que durante el período inductivo de la vernalización existen alternativas a distintos niveles de temperatura que tienen efectos diferentes sobre las plantas.

Por ejemplo, días con temperaturas bajas sin temperaturas máximas elevadas, satisfacen más rápidamente las necesidades de enfriamiento, por otro lado, si se presentan temperaturas máximas elevadas, la satisfacción en temperaturas bajas es menor y cuando es muy prolongada ésta elevación térmica, ocurre la desvernalización (eliminación del enfriamiento acumulado). Erez y Lavee 1971 (citados por Swets y Zeitlinger 1975).

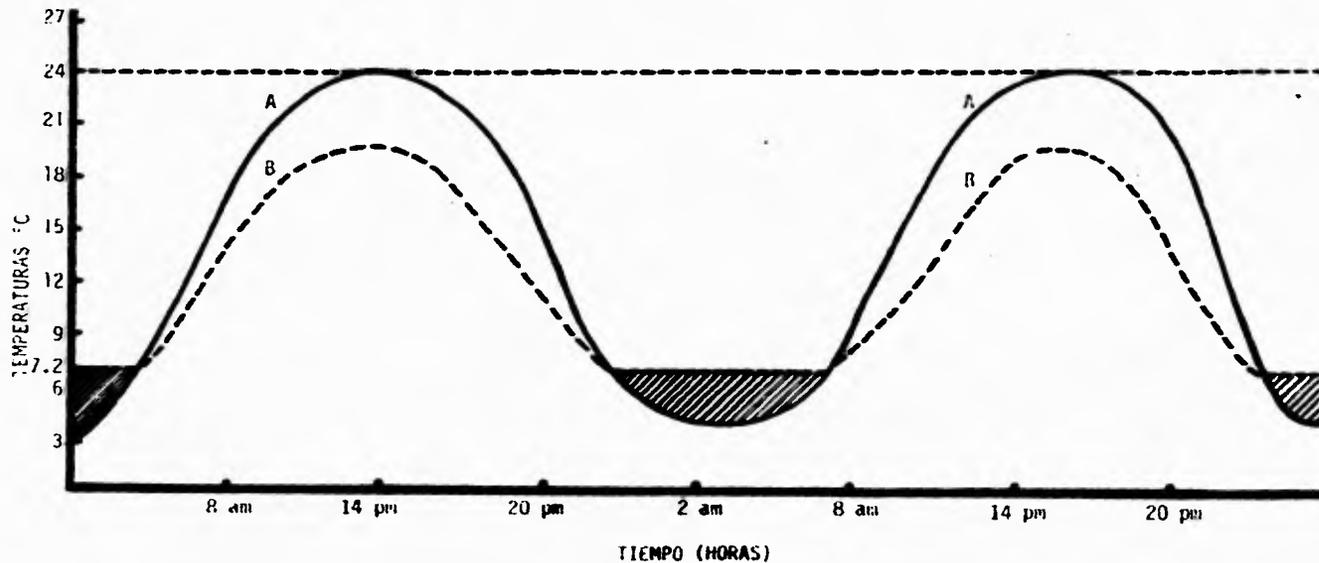


Figura 5.11 La acumulacion diaria de frio puede ser similar para diferentes localidades ("A" o "B"), pero su eficiencia será distinta si se presentan temperaturas muy altas en "A", que reduzcan o eliminen el frio acumulado. (Diaz M. 1987).

Para resolver el problema mencionado en el párrafo anterior, Richardson, et al, (1974), Ashcroft y otros (1977) propusieron otro método para estimar la cantidad de frío que requiere cada especie frutal para completar su período de dormancia. Este método utiliza el concepto de unidades frío en lugar de horas frío. Una unidad de frío como la definen los autores, es igual a una temperatura de 6°C con duración de una hora. Este método está basado en principios fisiológicos, ya que al subir o bajar la temperatura del punto óptimo de 6°C su contribución en la acumulación de unidades frío se reducirá a cero, a una temperatura de 1.4°C ; o bien a una temperatura de 12.4°C . La acumulación de unidades frío a partir de la temperatura de 16.0°C es negativa.

La figura 5.12 ilustra la relación general entre la temperatura al abrigo y en yema y la acumulación de unidades frío. En el Cuadro 16 se presenta la conversión de temperaturas a unidades frío, para varios valores de temperaturas horarias, con los cuales es posible estimar unidades frío en forma aproximada.

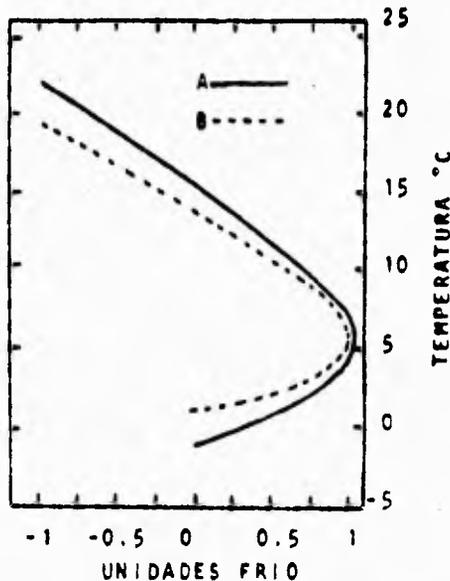


Figura 5.12. Relación entre Temperatura al Abrigo (A) y la Temperatura de la Yema (B) y las Unidades Frío Acumuladas para Frutales Caducifolios. (Lombard y Richardson, 1979).

Cuadro 5.5 Conversión de Varios Valores de Temperatura Horaria a Unidades Frío (Lombard y Richardson, 1979).

Abrigo	Temperatura °C		Unidades Frío
		Yema	
< 1.4	< 1.4	< 1.4	0
1.5 - 2.4	1.5 - 2.4	1.5 - 2.4	0.5
2.5 - 9.1	2.5 - 9.1	2.5 - 9.1	1.0
9.2 -12.4	9.2 -12.4	9.2 -12.4	0.5
12.5 -15.9	12.5 -15.9	12.5 -15.9	0
16.0 -19.4	16.0 -18.0	16.0 -18.0	-0.5
>19.5	>18.0	>18.0	-1.0

El modelo desarrollado por los autores inicia el cálculo de la acumulación de unidades frío al encontrar la última acumulación negativa máxima, día a partir del cual la acumulación negativa diaria es menor y gradualmente empieza a ser positiva, éste día se presenta durante el otoño.

La ecuación desarrollada por Richardson y otros (1974) para estimar las unidades frío a partir de temperaturas máximas y mínimas diarias ha sido tabulada por Del Real Laborde (1982) y se encuentra en la Tabla 5A del anexo.

El cálculo diseñado para éste modelo involucra la evaluación de unidades de calor crecimiento que las plantas necesitan para brotar cuando ya han completado su acumulación de frío. Una unidad de calor crecimiento se define como una hora a temperatura un grado centígrado sobre la temperatura base de 4.5°C (40°F). Las unidades calor crecimiento son calculadas sustrayendo 4.5°C de cada temperatura horaria entre 4.5 y 25°C, todas las temperaturas sobre 25°C (77°F) son consideradas como iguales a 25°C; por lo tanto la acumulación máxima para una hora es 20.5 unidades calor crecimiento. En la Tabla 6A del anexo Del Real-Laborde (1982) calculó las unidades calor crecimiento usadas en este modelo.

Debido a que existen pocos lugares donde se registra la temperatura en forma continua, se han desarrollado algunos métodos para su estimación a nivel horario; del Real (1982) desarrolló un método para estimar temperaturas horarias usando las temperaturas máximas y mínimas diarias. Este mismo autor preparó una tabla (tabla 1A anexo) donde se puede calcular las horas frío acumuladas para un día, un mes, todo el invierno, etc., a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias. Normalmente se usan los meses de noviembre a febrero para hacer el cálculo.

5.4 Índice Auxégeno e índice Tanatoclimático

Índice Auxégeno.

Por índice Auxégeno se considera como el valor de temperatura al cual se propicia el desarrollo vegetal.

Una forma como podría investigarse a un índice Auxégeno puede ser por medio de la búsqueda de relaciones entre temperatura y el comportamiento del cultivo (fenología). Es conveniente indicar que entre más información y más precisa sea de la temperatura y del cultivo más precisos serán los resultados.

La FAO (1978) considera al valor de 6.5°C como el Índice Auxégeno para los cuatro grupos de cultivos anteriormente mencionados.

Índice Tanatoclimático.

El índice tanato climático sería el valor de temperatura que causa la muerte de un cultivo, la información probablemente más importante es la fecha de heladas. Sobre todo de la primera y la última helada, ya que a partir de ellas podríamos obtener el período libre de heladas y de acuerdo con la disponibilidad de agua, sería posible establecer el período de crecimiento para algún cultivo de interés.

Cuadro 5.6. Características de los grupos de cultivos propuestos por la FAO (1978).

CARACTERÍSTICA	GRUPO DE CULTIVO			
	I	II	III	IV
Tipo de fotosíntesis	C ₃	C ₃	C ₄	C ₄
Tasa de fotosíntesis a sat. de luz y temp. óptima (mg CO ₂ /dm ² /h)	20-30	40-50	70-100	70-100
Temp. óptima (°C) para fotosíntesis máxima.	15-20	25-30	30-35	20-30
Intensidad de radiación solar a fotosíntesis máxima (cal/cm ² /min)	0.2-0.6	0.3-0.8	1.0	1.0
Tasa máxima de crecimiento (g/m ² /día)	20-30	30-40	30-60	40-60
Eficiencia en el uso del agua (g/g)	400-800	300-700	150-300	150-350
Cultivos importantes:	Trigo frijol* papa café garbanzo girasol	Frijol** soya arroz algodón naranja limón camote casava	Sorgo** maíz** caña mijo pastos	Sorgo** maíz* mijo pastos

* Tropical de altura >1500 m de altitud.

** Tropical de tierras bajas <1500 m de altitud.

CAPITULO 6

LA PRECIPITACION

EN EL DESARROLLO Y CRECIMIENTO

DE LA VEGETACION.

6.1 INTRODUCCION

El agua es uno de los elementos más importantes para la vida y para el desarrollo de los organismos. También todos los procesos *geomorfológicos* y *edafológicos*, que son las reacciones físicas y químicas que ocurren en la corteza terrestre y que dan lugar a la formación del suelo a partir de la roca, dependen de este elemento. El ciclo hidrológico y la dinámica del "tiempo" se manifiestan por medio de la precipitación.

El agua cubre aproximadamente el 60% de la superficie de la tierra. Los océanos constituyen la fuente hídrica más importante; el 97.2% de todo el agua existente en el planeta se encuentra en ellos; en los glaciares de los Polos está fijada en forma de hielo y nieve cerca del 2% del agua total; menos de 0.6% se encuentra como agua freática en los suelos; el agua de los lagos y ríos constituye solamente el 0.02%.

El agua está en constante movimiento. La atmósfera recibe agua en forma de vapor generado por medio de la evaporación de las superficies de los mares y la tierra firme y la transpiración de los organismos vivos. Por medio de las lluvias el agua de la atmósfera se precipita y regresa de esta manera a la tierra. Una gran parte del agua que reciben los continentes vuelve a los océanos por medio de los ríos y, así se repite el ciclo hidrológico. En la atmósfera se encuentra en promedio solamente el 0.0001% del total del agua existente en el planeta. Si bien esto representa relativamente un bajo valor de la cantidad total de agua, la velocidad del ciclo y la energía con que se produce en la atmósfera son enormes; de esta manera, cada ocho o diez días, la atmósfera cede toda su agua mediante diversas formas de precipitación y recupera la misma cantidad por medio de la evaporación.

6.2 Componentes y procesos generales

Para tener una idea respecto a la velocidad de circulación o a la cantidad de agua, se puede imaginar que

si toda el agua atmosférica cayera por lluvias en un sólo momento, se formaría una capa de 25 mm de agua sobre toda la superficie de la tierra.

Para mantener este ciclo y con ello la vida, es necesario que el agua cambie continuamente de ubicación y de estado físico en la naturaleza. Estos cambios son esenciales para la vida y constituyen, en conjunto, el denominado *Ciclo Hidrológico*.

El agua se presenta en tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. Las moléculas de agua pueden pasar de un estado a otro absorbiendo o liberando calor. Pueden pasar del estado gaseoso al líquido por *condensación*; si las temperaturas son inferiores a 0°C pasan directamente al estado sólido por *sublimación*, produciéndose cristales de hielo. En el proceso de *evaporación*, las moléculas abandonan la superficie del agua líquida y se transforman en moléculas gaseosas. El cambio directo del estado sólido al gaseoso se denomina también *sublimación*. El agua puede pasar del estado líquido al sólido por *congelación* y del estado sólido al líquido por *fusión*. Los diferentes cambios de estado del agua se grafican en la Figura 6.1

La dinámica del agua en la naturaleza es regida por los procesos físicos descritos, y también por una serie de leyes que se irán explicando a lo largo de este capítulo.

De la Figura 6.2 se desprende que los procesos más importantes en el ciclo hidrológico de la naturaleza lo constituyen la *evaporación* y la *transpiración*, por los cuales el agua asciende hacia la atmósfera, la *formación de nubes* en las que el vapor de agua se va concentrando hasta *condensarse* para luego precipitar en forma de *nieve*, *granizo*, *lluvia* o *llovizna* y las diversas formas de traslado del agua en la superficie de la tierra para reiniciar el ciclo.

6.3 La Humedad del aire

El término *humedad del aire* hace referencia a la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera. La cantidad de vapor que la atmósfera puede contener varía notablemente en el tiempo y en el espacio. La cantidad de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire se puede expresar en gramos de vapor por metro cúbico de aire (g/m³), en cuyo caso se habla de *humedad absoluta*.

El inconveniente de utilizar la humedad absoluta cuando se estudia la humedad atmosférica estriba en que, cuando el aire se eleva o desciende, sufre los cambios de volumen correspondientes: *expansión* o *compresión*. Por lo tanto, la

humedad absoluta, que se refiere a una misma masa de aire, no es constante. Por ello, para expresar la humedad, utilizamos la *humedad específica*, que es el cociente entre la masa de vapor de agua y la masa de aire húmedo (aire que incluye vapor de agua).

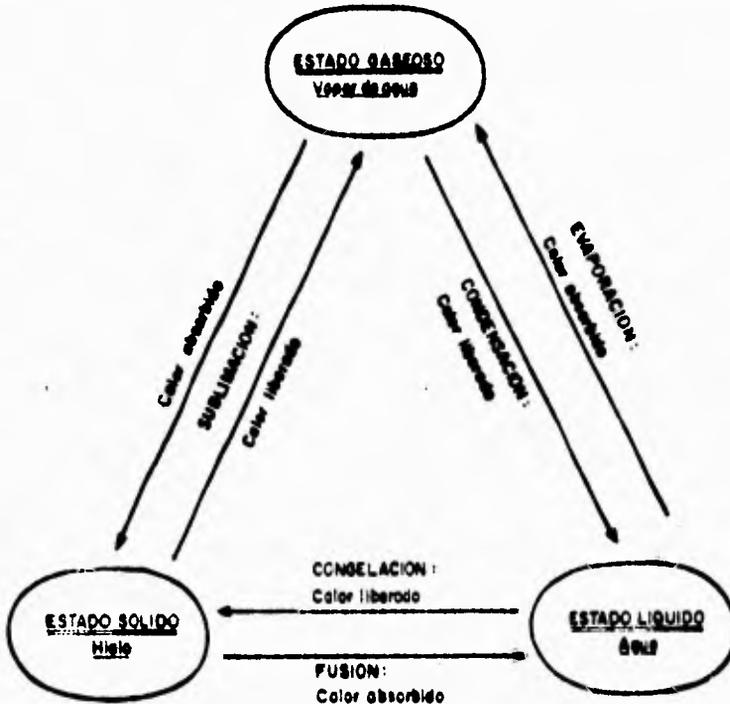


Figura 6.1 Transformación del estado físico del agua y absorción o liberación de energía en los diferentes procesos. (Strahler, 1981).

La *humedad específica* se mide en gramos de vapor de agua por metro cúbico de aire húmedo. Cuando una determinada masa de aire se eleva sin ganar o perder humedad, la humedad específica permanece constante, a pesar del aumento de volumen. El aire extremadamente frío y seco de las regiones árticas en la época invernal puede tener una humedad específica de sólo 0.2 gramos por metro cúbico, mientras que el aire cálido y húmedo de las regiones tropicales puede contener hasta 28 gramos por metro cúbico. Según esto, también se puede hablar de presión de vapor, que constituye una parte de la Presión Atmosférica y se expresa en milibares (mb).

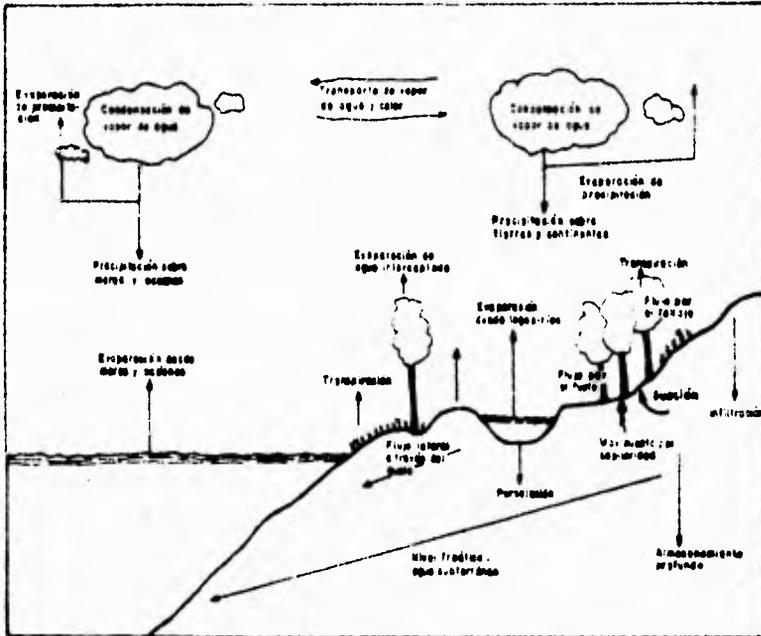


Figura 6.2 El ciclo Hidrológico en la naturaleza.
(Adaptado de Jackson, 1977).

A cada temperatura, le corresponde un límite característico en cuanto a la cantidad de vapor de agua que la atmósfera pueda contener. Este límite se denomina *punto de saturación*. El cociente entre la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera en un momento dado (h) y la máxima que podría contener en ese mismo momento (H) se expresa en forma de porcentaje y se denomina *humedad relativa*.

$$H_{rel} = \frac{h}{H} \cdot 100$$

En el punto de saturación, la humedad relativa es del 100%. Si la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera es igual a la mitad de la máxima posible, la humedad relativa es del 50%.

La humedad absoluta del aire se modifica por captación o entrega del vapor del agua. La cantidad máxima contenida en un determinado volumen de aire, a una temperatura dada, puede ser aumentada al subir su temperatura; si disminuye la temperatura, disminuirá consecuentemente la capacidad de retención de agua.

En la figura 6.3 se observa como se modifica la capacidad de retención del agua del aire (expresada en presión de vapor) al variar la temperatura. Así, a una temperatura T_1 , la capacidad máxima de retención es de P_1 . Al aumentar la temperatura de T_1 a T_2 , sube el punto de saturación de S_1 a S_2 . Esto significa que el volumen de aire considerado aumenta su capacidad de retención de vapor de P_1 a P_2 (zona punteada). Al disminuir la temperatura de T_1 a T_3 , baja el punto de saturación de la misma masa de aire desde S_1 a S_3 , con lo cual debe entregarse el excedente de agua correspondiente (zona rayada). Así se genera la precipitación por medio de un proceso llamado condensación que será explicado más adelante.

En la práctica, se usa normalmente el concepto de la humedad relativa por la razón de que los procesos de la transpiración y la evaporación dependen de la capacidad de aire para absorber el vapor de agua.

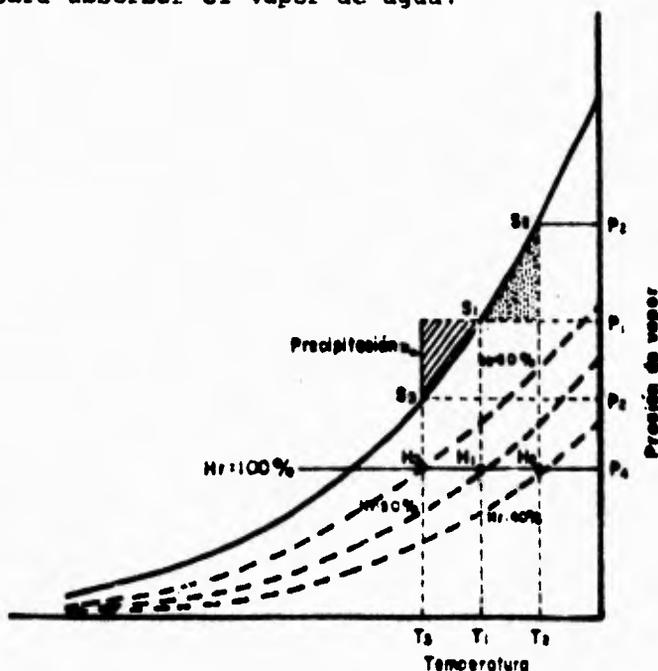


Figura 6.3. Relación entre la temperatura del aire y su capacidad de retención de agua.

Supongamos que bajo una cierta temperatura del aire T_1 (figura No. 6.3), la humedad relativa es del 50%. Si la temperatura sube de T_1 a T_2 , la humedad relativa disminuirá al 40% sin que se haya variado la cantidad de vapor de agua contenido en el volumen de aire considerado (P_4). Al bajar la temperatura de T_1 a T_3 , aumentará la humedad relativa al 60%, permaneciendo la presión de vapor en P_4 . Estos aspectos, tienen una influencia notable sobre los organismos.

Para las plantas, significa en el primer caso (40% de H rel) un aumento de la transpiración, dado que la fuerza de succión de agua de la atmósfera aumenta. En el segundo caso (60% de humedad relativa), la transpiración de la planta disminuye, dado que la fuerza de succión de la atmósfera es menor. Todo esto ocurre a pesar de que el contenido absoluto del vapor de agua en la atmósfera no ha variado.

La temperatura crítica correspondiente a la saturación, y por debajo de la cual tiene lugar la condensación, se denomina *punto de rocío*. Un ejemplo de condensación del vapor de agua por enfriamiento nos lo proporciona las gotas de agua que se forman en el exterior de un vaso que contiene agua con hielo. El aire inmediatamente adyacente al vidrio se enfría lo suficiente para sobrepasar el punto de rocío, haciendo que la humedad atmosférica se condense sobre el vaso.

Formación de Nubes y Niebla.

Las primeras expresiones visibles del vapor de agua, sin que llegue a la precipitación, son la niebla y las nubes.

Ambas están constituidas por gotas de agua muy finas formadas por condensación del vapor de agua. Las gotitas presentan diámetros inferiores a 0.1 mm y son tan livianas que no pueden ser atraídas hacia la tierra por la gravedad y en cambio son transportadas por las masas de aire.

El proceso de condensación presupone la presencia de núcleos de condensación, de suficiente cantidad de vapor de agua y de bajas temperaturas. Como casi siempre se encuentran presentes en la atmósfera núcleos de condensación así como vapor de agua, la temperatura resulta el factor determinante en la condensación.

Los descensos de temperatura de una cierta masa de aire pueden sobrevenir por contacto con masas de aire más frío que se encuentran a su misma altura o al ascender hacia estratos más fríos de la atmósfera.

Cuando las masas de aire caliente se desplazan sobre superficies de la tierra más frías que ellas y se cumplen las condiciones arriba mencionadas, se produce condensación, en cuyo caso hablamos de niebla.

La formación de las nubes se origina bajo las condiciones que acabamos de señalar, pero en estratos más altos de la atmósfera. Cuando la temperatura en las nubes o neblina continúa disminuyendo más allá del punto de rocío, las pequeñas gotitas se reúnen aumentando su tamaño hasta que comienzan a ser atraídas a causa de la gravedad, generando la precipitación.

6.4 La Precipitación

La lluvia, la llovizna, la nieve y el granizo se designan en conjunto con el nombre de precipitación, y se producen cuando grandes masas de aire experimentan un descenso uniforme de la temperatura por debajo del punto de rocío, en cuyo caso se genera una rápida condensación del vapor de agua en el interior de las nubes.

Una masa de aire se puede enfriar al ponerse en contacto con otras masas de aire frío, en cuyo caso cede parte de su calor. Existen otros procesos, llamados adiabáticos, en los cuales una masa de aire puede modificar su temperatura sin que se le agregue o quite calor desde afuera. Este fenómeno ocurre por modificación de la presión sobre la masa de aire en cuestión. Así, al disminuir la presión, dicha masa disminuye su volumen con lo cual las moléculas que la constituyen se acercan y chocan entre sí con mayor frecuencia, aumentando así su temperatura en forma sensible.

El enfriamiento por ascenso de las masas de aire reviste especial importancia en las precipitaciones. El ascenso se puede producir por las vías que a continuación se exponen:

Convección.

La convección ocurre cuando una masa de aire se calienta y asciende por ser más liviana que las masas circundantes. A medida que sube ésta se va enfriando adiabáticamente hasta igualar su temperatura con el aire que le rodea. Si la temperatura de esta masa de aire desciende por debajo del punto de rocío, se producirá precipitación. Este tipo de precipitación es frecuente en zonas cálidas y húmedas. En las latitudes medias, sólo ocurre en la estación calurosa. Este fenómeno puede originar tormentas que, a

menudo, van acompañadas de truenos, relámpagos y lluvias de gran intensidad y corta duración.

Ascenso orográfico.

El ascenso orográfico ocurre cuando las montañas interceptan masas de aire movilizadas por el viento y las obligan a subir, generando su enfriamiento. Esto suele originar precipitaciones en el lado de la montaña donde se estrellan las masas de aire, denominada ladera de barlovento. El aire, con menos humedad, pasa al otro lado de la montaña (ladera de sotavento) por donde desciende. En sotavento suelen presentarse zonas de clima seco denominadas "sombras de lluvia".

Convergencia de masas de aire.

Son choques de masas de aire que se desplazan horizontalmente. En los Trópicos, generalmente, las masas que convergen poseen temperaturas similares. En latitudes medias, pueden presentarse diferencias notables de temperatura, en cuyo caso las masas calientes ascienden sobre las más frías, generando lo que se conoce como ascenso frontal.

Frentes fríos.

Las masas de aire frío, debido a su mayor peso se desplazan por las partes bajas y, operando como cuñas, obligan a las masas de aire más cálido a ascender por encima de ellas. El paso de un frente frío viene acompañado de un descenso de la presión atmosférica, la cual vuelve a subir luego del paso del frente frío. La pendiente de la superficie del frente frío puede adoptar los valores desde 1:40 hasta 1:80 (por cada 40 m y hasta 80 m, respectivamente, de avance horizontal la masa caliente asciende 1 m de altura) lo cual genera un ascenso bastante violento del aire caliente, que suele traducirse en fuertes perturbaciones atmosféricas, generalmente tormentas.

Frentes cálidos.

Se producen cuando las masas de aire caliente se desplazan sobre las masas de aire frío como sobre una pendiente. Las pendientes de los frentes cálidos oscilan entre 1:80 y 1:200, de modo que el ascenso es lento y se lleva a cabo sobre grandes extensiones. La lluvia que se genera en estos casos es continua y ligera.

Ciclones y anticiclones móviles.

Son considerados vientos irregulares y se originan en zonas de baja presión y alta presión respectivamente. En los ciclones generados en centros de baja presión, las masas de aire suben cargadas de humedad provocando fuerte inestabilidad; por el contrario, los anticiclones son corrientes de aire descendente seco que traen consigo calma y estabilidad.

En las regiones tropicales e intertropicales, la precipitación es el elemento climático más variable. La precipitación total anual generalmente varía mucho de año en año y de lugar en lugar. También varía la distribución diurna y estacional y la intensidad, duración y frecuencia de las lluvias.

6.5 Características de la Precipitación en los Trópicos.

En los trópicos, la principal causa del enfriamiento de las masas de aire es el ascenso convectivo, que genera las tormentas. El ascenso del aire en latitudes cercanas al ecuador, es, a menudo, de mayor velocidad y de menor duración que el que se presenta en latitudes medias, debido a la alta radiación.

Algunas características típicas de la precipitación en los trópicos son las siguientes:

a) Las masas de aire que asciende generalmente son cálidas y con alto contenido de humedad. Estas masas de aire alcanzan el nivel de condensación a temperaturas relativamente altas y, en consecuencia, forman nubes constituidas por gotas de agua y, raras veces, por cristales de hielo. Las nubes tropicales, frecuentemente, producen copiosas lluvias y se encuentran a alturas donde la temperatura está muy por encima del punto de congelación.

b) Los altos cúmulos de precipitación son causados por una serie de factores, generalmente, combinados. El más importante de éstos es, por supuesto, la Zona de Convergencia Intertropical (Z.C.I.) y el tiempo de permanencia sobre cierta área. Esto se demuestra por las altas cantidades de lluvia caída sobre el Océano Pacífico, ligeramente el norte del Ecuador, donde la Z.C.I. se presenta casi a lo largo de todo el año. Sobre el Océano Atlántico existe una zona similar; las precipitaciones presentan características de menor intensidad, ya que el factor que se asocia a las altas cantidades de lluvia caída es el ascenso orográfico. De especial importancia son los choques de los vientos alisios contra las barreras

montañosas que producen alta precipitación. Otro factor lo constituye la presencia de los ciclones tropicales en determinadas áreas, como el Caribe.

c) Las tierras altas y las montañas reciben más precipitación que las tierras bajas vecinas, al menos en sus vertientes de barlovento. Esto es resultado del ascenso orográfico, que incrementa las lluvias en todos los climas. El efecto de este ascenso es diferente en latitudes tropicales con respecto a latitudes extratropicales. Fuera de los trópicos, la cantidad de precipitación se incrementa con la altura hasta los niveles más altos de las montañas; en cambio, en los trópicos, el incremento ocurre hasta alturas de 1000 m a 1500m, y, a partir de esta altitud, generalmente la precipitación disminuye con la altura. Esto se debe a que el contenido de vapor e agua en las capas más bajas es mayor que en las más altas y al predominio de movimientos verticales del aire, en donde el desplazamiento horizontal de la humedad es, a menudo, limitado.

La distribución estacional de la lluvia.

En la mayoría de los climas tropicales húmedos, se produce precipitación durante todo el año. La estacionalidad de las lluvias interesa desde el punto de vista de su cantidad en cada período. Este factor controla el calendario de las actividades agrícolas en estos climas. Aquí, el inicio, la duración y el término de la estación lluviosa son decisivos para la producción de alimentos. La estación lluviosa también implica temperaturas más bajas y condiciones de mayor humedad y nubosidad que los períodos secos (precipitación de menos de 100 mm por mes. Además, ejerce una influencia directa sobre todas las actividades realizadas a la intemperie.

La variación diurna de la precipitación en los trópicos.

La variación diurna de las lluvias determina en general las condiciones del tiempo. Tiene una gran influencia sobre las actividades realizadas al aire libre y sobre el transporte, ya sea aéreo o terrestre, además influye en la eficiencia de las lluvias en la agricultura; por ejemplo, la lluvia que cae durante las horas más calientes del día, está sujeta a grandes pérdidas por evaporación.

Se presentan dos tipos de régimen diario de lluvias:

a) El tipo continental, que muestra un máximo de lluvia después del mediodía. La principal razón para esta distribución es, por supuesto, la convección causada por el calentamiento de la superficie terrestre,

b) El tipo costero o marítimo que muestra un máximo de lluvia después de medianoche. Este régimen es causado por el fenómeno conocido como "convección nocturna", que corresponde al resultado del ascenso de las masas de aire húmedo provenientes del mar (que está más caliente durante la noche que la tierra firme) y de su desplazamiento hacia las costas, donde se suman a las masas frías ya existentes y aceleran el proceso de precipitación.

6.6 Cálculo de probabilidades de lluvia

La producción de cultivos en áreas de temporal está determinada en gran parte por la cantidad y oportunidad del agua de lluvia. En éstas áreas, para desarrollar una tecnología enfocada a incrementar y estabilizar la producción de cultivos, se requiere primero de un entendimiento de la variación en tiempo y espacio de los elementos climáticos y de su influencia sobre el rendimiento de los cultivos. Bajo estas condiciones, la cuantificación de la precipitación pluvial en términos de probabilidad y no de promedios aritméticos, resulta de primordial importancia, ya que en la mayoría de los casos, la lluvia es el factor clave para determinar el potencial de producción agrícola de una región dada.

A través del cálculo de probabilidades de lluvia es posible determinar y optimizar varias actividades agrícolas, tales como: fechas de siembra, fechas de cosecha, duración del período húmedo disponible dependiendo de su tolerancia a la sequía, prácticas de captación de agua de lluvia, dosis de fertilizante para aplicar a un cultivo y otras más.

La aplicación de probabilidades de lluvia en diversas actividades, incluyendo a la agricultura, ha sido reportado por varios autores (Barger 1948, Barger, et al, 1959, García, et al, 1973, Carrillo y Casas, 1974, Arruda y Pinto 1980).

En el cálculo de probabilidades de lluvia pueden utilizarse tanto métodos gráficos como funciones probabilísticas. El método a emplearse dependerá de los objetivos y de la precisión requerida. Algunos trabajos en donde se han empleado funciones probabilísticas se mencionan a continuación:

Barger y Thom (1949) reportaron un estudio sobre la evaluación de probabilidad de las sequías en el estado de Iowa, E.U.A., en el cual se mencionan por primera vez a la función gama incompleta como modelo en la representación de la distribución de lluvia y un método relativamente simple para la resolución de las ecuaciones de máxima verosimilitud de la función gama.

Barger, et al (1959) en otro estudio, donde utilizaron la distribución gama, calcularon probabilidades de lluvia para 1, 2 y 3 semanas a través del año. Este trabajo fue realizado para varios estados de la región norte-centro de los Estados Unidos, donde se usaron estaciones climatológicas con no menos de 25 años de registros de lluvia.

Carrillo y Casas (1974), reportaron un estudio en el que probaron el método de distribución gama para calcular las probabilidades de lluvia con datos de dos estaciones meteorológicas con diferentes regímenes de lluvia, una de ellas localizada en Des Moines, E.U.A., y la otra en Huajapan de León, Oax., México, los resultados obtenidos indicaron que la distribución gama se ajustó en forma satisfactoria cuando se compararon los datos de lluvia estimados con esta función, con los datos de lluvia observados en ambas localidades.

León y Palacios (1977), señalaron haber trabajado con el criterio de bondad de ajuste de Smirnov para estudiar el comportamiento de cinco funciones probabilísticas (normal, log normal, gama, T Cramer y, log T Cramer) en relación a la distribución de lluvia para períodos de $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 21, 28$ y 365 días. Utilizaron datos de trece estaciones de México y Colombia con 7 a 44 años de registro, en áreas con precipitación media anual de 352.6 a 2498.9 mm. Señalaron que de acuerdo a la Teoría, las distribuciones T Cramer y log T Cramer se ajustan mejor que la normal y log normal, respectivamente. Concluyeron que en general las distribuciones log T Cramer y gama mostraron los mejores ajustes.

En México, **García, et al , (1973)**, consignaron haber trabajado con estaciones climatológicas de todo el país que hasta el año de 1970 tuvieran una serie histórica de datos mínima de 15 años. A partir de estos datos, este grupo de investigadores calcularon probabilidades de lluvia en base a la función gama incompleta, para períodos mensuales, de mayo a octubre, de noviembre a abril y anuales. Los resultados de este trabajo están publicados en una colección de 20 volúmenes que cubren íntegramente el territorio nacional y 15 cartas generales del país.

La evaluación de probabilidades de lluvia para un período dado, no solamente se puede realizar en base a su cantidad total, sino también al número de lluvias necesarias para obtener dicha cantidad. De esta manera dos variables aleatorias, cantidad total y número de lluvias pueden evaluarse conjuntamente, la primera, con la distribución gama y la segunda con una distribución discreta (Poisson, Binomial, etc). La probabilidad total será el producto de las dos probabilidades antes mencionadas.

Usando el método antes mencionado, **Fernández y San Román (1983)** calcularon la probabilidad conjunta de lluvia total para períodos mensuales del Distrito de Temporal No. IV de Tehuacán, Puebla. Para calcular la cantidad de lluvia usaron la distribución gama y para el número de lluvias la distribución Poisson. Estos autores concluyen en su estudio diciendo que este método es un procedimiento más confiable para obtener pronósticos de lluvia.

Las probabilidades de lluvia pueden ser estimadas como probabilidades iniciales o independientes ($P(R)$) y probabilidades condicionadas. En el segundo tipo de probabilidades se examina cada periodo pero considerando la probabilidad obtenida del periodo inmediato anterior. Bajo éste contexto, es posible examinar la probabilidad de lluvia de la próxima semana, si ésta semana fue húmeda ($P(R/R)$); y la probabilidad de que la próxima semana sea húmeda, si ésta semana fue seca ($P(R/D)$) (**Virmani, et al , 1982**).

Empleando este método, **Virmani, et al . (1982)** estimaron probabilidades iniciales y condicionadas de lluvia para 77 estaciones climatológicas de la India. Estas probabilidades fueron calculadas para períodos semanales en varias etapas durante el año:

- 1) inicio del temporal de lluvias,
- 2) periodo húmedo,
- 3) final del temporal de lluvias, y
- 4) estación seca.

Para el cálculo de probabilidades iniciales y condicionadas estos investigadores desarrollaron un algoritmo de computación empleando como base de cálculo el método de cadena de Markov.

Estos investigadores concluyen, que un análisis de la precipitación pluvial realizada de esa manera es muy útil para planeación, trabajos de investigación y para toma de decisiones en varias actividades agrícolas.

Villalpando, et al . (1984) llevaron a cabo un proyecto para obtener las probabilidades de lluvia para períodos de 5 y 10 días, en base a la función gama incompleta, para cada una de las estaciones climatológicas ubicadas dentro del área de influencia de los Campos Agrícolas Experimentales, que fueron seleccionadas por la calidad de sus datos.

Calidad de los datos.

En general se puede decir que cuando se investiga la variabilidad de la lluvia y la estimación de probabilidades para su aplicación en la agricultura, se trata de saber con qué frecuencia se recibirá determinada cantidad de lluvia y

la frecuencia con que se recibirá una cantidad superior o inferior a ella.

La respuesta se especifica en forma de fracción o porcentaje de probabilidad. Por ejemplo 0.75 o 75% de probabilidad; o bien, 1 de cada 4, ó 5, ó 10 años, etc.

No tiene utilidad para fines agrícolas especificar una probabilidad inferior al 10% (1 de cada 10 años) o superior al 90% (9 de cada 10 años).

Con frecuencia los grados de probabilidad que se adopten dependen de consideraciones económicas, así por ejemplo se puede aceptar que un cultivo fracase 1 de cada 5 años, ó 1 de cada 10 años, etc.

La aplicación de estos análisis son evidentes en las prácticas agrícolas, una vez que se conoce la demanda mínima de lluvia de determinado cultivo, se pueden evaluar rápidamente los riesgos de establecer dicho cultivo en una región. Esto constituye desde luego la primera medida que deberá adoptarse, para después, investigar la distribución de la lluvia durante el período de crecimiento del cultivo y otras como la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo.

La seguridad del análisis tiene dos restricciones principales:

- a) Su validez en cuanto a extensión es limitada, especialmente en áreas montañosas, y
- b) Las series de observaciones de lluvia de menos de 10 ó 15 años no contienen suficientes datos para llegar a conclusiones definitivas.

Antes de iniciar los procedimientos matemáticos o estadísticos en el cálculo de probabilidades de lluvia es importante verificar la calidad de los datos, de los registros que faltan y de las observaciones dudosas.

Existen varias pruebas para analizar los datos de una serie climática, son la Asimetría, prueba de recorrido (run test) y la prueba de t.

Asimetría.

Cuando existe asimetría, los valores de la mediana (m) y de la media (p) difieren y ésta se evalúa mediante el índice de Asimetría.

$$\text{I.A.} = \frac{m - p}{p} \times 100$$

Por ejemplo, para la estación de Pénjamo, Gto., se tienen los siguientes datos de precipitación para el mes de agosto (ejemplo tomado de Ortiz, 1984):

<u>Año</u>	<u>Precipitación</u> (mm)
1951	370
1952	105
1953	191
1954	82
1955	203
1956	82
1957	122
1958	211
1959	216.5
9 años	suma = 1582.5

Para obtener la mediana se ordenan los datos:

82, 82, 105, 122, 191, 203, 211, 216.5, 370

$$m = 191$$

Y la media:

$$p = \frac{p}{n} = \frac{1582.5}{9} = 175.8$$

$$\text{I.A.} = \frac{191 - 175.8}{175.8} \times 100 = \frac{15.2}{175.8} \times 100 = 8.64\%$$

Habitualmente la simetría no influye en las pruebas de homogeneidad y según Thom (1966) una serie asimétrica de datos de lluvia puede suponerse normalmente distribuida, sobre todo para datos anuales.

En muchos casos tenemos que tratar de averiguar la causa real de esta anomalía, que pueden ser datos muy bajos o la ocurrencia de un dato muy alto, que perturba la simetría. En este último caso podemos llegar a la conclusión de que se puede tolerar la omisión de un dato extremo, para obtener un mejor ajuste con la distribución normal y por

consiguiente una estimación más precisa de la probabilidad. Para fines agrícolas esto nos llevará a obtener estimaciones o probabilidades ligeramente inferiores, es decir, un mayor margen de seguridad.

En el ejemplo anterior, si se elimina el dato más alto, 370 mm, la mediana sería $m = 156.5$, y la media $p = 151.5$, lo que nos da un índice de asimetría del 3.3%, que es inferior al calculado con anterioridad.

Homogeneidad de los datos climáticos.

Sobre la homogeneidad de los registros, existe una excelente y fácil manera de realizarla, con el **Método de Sved-Eisenhart**, conocida como **Prueba de recorrido o Run Test**.

Se ordena y gráfica los datos en orden cronológico y después de haber determinado el valor de la media ó de la mediana, se cuenta el número de veces en que la serie cambia de valores superiores a inferiores respecto a la media o a la mediana, dependiendo de la que se elija.

El número total de cambios (U) se aumenta en una unidad y se compara con los límites de la distribución normal que se halla a partir de:

$1 + 1.1 (n/2)$	Limite superior
$-1 + 0.9 (n/2)$	Limite inferior

en donde n es el número de años de la serie climática.

Cuando (U) está entre estos límites se considera que la muestra es homogénea, con lo cual puede hacerse un análisis de probabilidad normal.

Para ilustrar el uso de esta prueba se utilizará el ejemplo dado por Villalpando (1984), en el que se emplearon los datos de totales de lluvia del mes de julio, para el periodo de 1950 a 1973, correspondientes a la estación climatológica de Cuquío, Jalisco.

Para llevar a cabo esta prueba se efectúan los siguientes pasos:

- 1) Graficar los totales de lluvia mensuales en función al tiempo (periodo de 1950 a 1973, figura 6.4),
- 2) Sobreponer sobre esta gráfica el valor correspondiente a la media (206 mm) y/o la mediana (217 mm) de precipitación del mes de julio.
- 3) tabular los valores de lluvia de julio (cuadro 6.1). A continuación llevar a cabo el conteo del número de cambios hacia arriba (+) o hacia abajo (-) de la media o de la

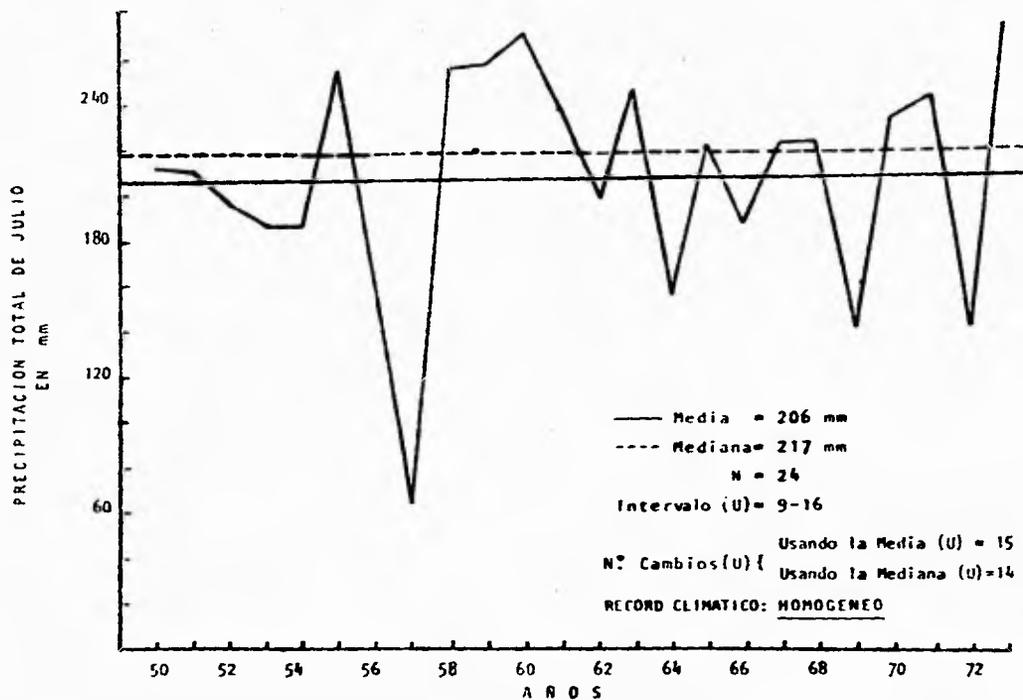


Figura 6.4 Gráfica de valores de lluvia total de julio y prueba de recorrido (run test) para la estación climatológica de Oguizo, Jalisco. Durante el periodo de 1950 a 1973. (Villalpando, et al. 1984).

mediana según se elija. Cabe mencionar que ambas medidas de tendencia central pueden ser utilizadas como criterios para probar la aleatoriedad de la serie climática.

Cuadro 6.1 Prueba de recorrido (Run Test) para la serie climática de totales de lluvia del mes de julio de la Estación Climatológica de Cuquío, Jalisco.

año	lluvia mensual (mm)	marca	año	lluvia mensual (mm)	marca
1950	212	+	1962	197	-
51	211	+	63	246	+
52	196	-	64	136	-
53	187	-	65	222	+
54	187	-	66	177	-
55	232	+	67	222	+
56	167	-	68	225	+
57	65	-	69	141	-
58	256	+	1970	235	+
59	257	+	71	240	+
1960	271	+	72	141	-
61	238	+	73	272	+

media = 206 mm n = 24 No. de cambios (U) = 15 intervalo de (U) = 9 - 16 Récord = Homogéneo					
--	--	--	--	--	--

En este ejemplo (U) = 15, si (U) es pequeño, esto significa que algún tipo de tendencia o cambio de dirección en la distribución de los datos está presente en el período de muestreo. Esto puede deberse a cambios de lugar de la estación climatológica, cambios en las prácticas de observación, exposición directa a la luz y al calor de los instrumentos, o bien, cambios climáticos. Cuando (U) es grande, alguna forma de oscilación puede ser la causa.

Para probar si el valor calculado de (U) es significativo, se usa el Cuadro 6.2. En este cuadro se presentan límites significativos aproximadamente para 10% y 90%. Si el valor calculado de (U) cae dentro del intervalo dado, correspondiente al número de datos, el récord será homogéneo. Para este ejemplo N = 24 y (U) = 15, el récord es homogéneo.

Cuadro 6.2 Tabla de distribución del número de recorridos o cambios (U) y el intervalo para (U), para probar si la serie climática es homogénea. (Doorenbos, 1976).

años	intervalo (U)	años	intervalo (U)	años	intervalo (U)
12	5 - 8	26	10 - 17	40	16 - 25
14	5 - 10	28	11 - 18	50	22 - 30
16	6 - 11	30	12 - 19	60	26 - 36
18	7 - 12	32	13 - 20	70	31 - 41
20	8 - 13	34	14 - 21	80	35 - 47
22	9 - 14	36	15 - 22	90	40 - 52
24	9 - 16	38	16 - 23	100	45 - 57

Villalpando (1984), hace la aclaración que para llevar a cabo análisis estadísticos, la serie climatológica de datos debe ser homogénea, es decir, que provenga de una sola población, de otra manera es necesario ajustar los datos empleando los registros de una estación cercana, en donde haya probado que esta serie climática es homogénea.

Cuando se cuente con número grande de años con registros climáticos y se conozca la causa de la heterogeneidad de una serie climática, la prueba t de Student puede ser usada para probar si tal heterogeneidad es o no significativa. Por último, debe mencionarse que en caso de hacer un ajuste a datos decenales, mensuales o anuales, la causa y el tiempo de ocurrencia de la no homogeneidad de los datos debe ser conocida.

Prueba de t Student.

Cuando se conoce la causa por la cual el récord climatológico de una estación es heterogéneo (por ejemplo cambio de localización) y además la serie climática es de muchos años, se recomienda usar la prueba de t para probar si tal heterogeneidad es o no significativa.

La prueba de t se expresa como sigue:

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma X_1 + \sigma X_2}{n_1 + n_2}}} = \frac{d}{sd}$$

Para aplicar esta prueba el récord climático comúnmente se divide en dos partes iguales. Se determina la media de cada periodo, así como las desviaciones de la media para cada parte de la serie climática. Para calcular el valor de t se obtiene la diferencia entre las dos medias (X_1 y X_2) y ésta se divide entre el error estándar de la diferencia ($\Sigma X_1 - \Sigma X_2$). El valor de t así obtenido se compara con un valor tabulado usando los grados de libertad correspondiente para ver si la serie es homogénea o heterogénea, es decir, que la media del primer periodo es significativamente diferente de la media del segundo periodo de observación.

6.7 Metodologías para el cálculo de probabilidades de lluvia

En el cálculo de probabilidades de lluvia pueden utilizarse diversos métodos. El método a emplearse dependerá de los objetivos y de la precisión requerida.

Método de Frecuencias.

El método más simple para calcular probabilidades de lluvia es agrupando los datos de lluvia en clases de igual intervalo y que abarquen el rango de 0 a 100.

Para ilustrar este método, se usaran los datos de lluvia mensual:

Año	mm/mes	Año	mm/mes
1956	75	1964	35
57	85	65	80
58	50	66	45
59	65	67	25
60	45	68	60
61	30	69	75
62	20	70	40
63	65	71	55

El valor más alto es de 85 y el más bajo 20 mm. Si se usan clases de intervalos de 10 mm se tiene:

Clase	Frecuencia	Clase	Frecuencia.
0 - 9	0	50 - 59	2x
10 - 19	0	60 - 69	3x
20 - 29	2x	70 - 79	2x
30 - 39	2x	80 - 89	2x
40 - 49	3x	90 - 99	0

Una indicación exagerada de la probabilidad de lluvia para una cantidad dada es obtenida dividiendo el número de veces que la cantidad seleccionada cae dentro de una clase y dividido por el número de años con registros.

Por ejemplo:

Cual es la probabilidad de que la precipitación mensual sea igual o mayor que 40 mm?

P (lluvia $>$ 40 mm). Esta será igual a $12/16 = .75$ ó 75%

Es decir, 3 de cada 4 años, para un período largo de tiempo la precipitación será igual o mayor de 40 mm.

Distribución Acumulativa.

La distribución acumulativa nos da la probabilidad mediante la fórmula:

$$F = \frac{N}{n + 1} \cdot 100$$

donde N es el número de orden y n el número de años. F es la probabilidad de ocurrencia de una cantidad de lluvia mayor o igual a un valor establecido, $P (X > X_0)$. También se podría inferir lo contrario con la fórmula:

$$1 - F = P (X < X_0)$$

Para ilustrar la aplicación de la distribución acumulativa en el cálculo de probabilidades de lluvia, se mostrara un ejercicio reportado por Villalpando (1984), en donde se utilizaron los totales de lluvia de 80 días (55 días antes y 25 días después de la fecha promedio de jiloteo de maíz) para la región de Aldama, Guanajuato. El período de análisis comprenderá de 1949 a 1979, cuadro 6.3.

Los pasos a seguir en este método son:

a) Tabular los totales de lluvia para el período dado de 80 días para la estación climatológica de Aldama, Gto., para el período de 1949 a 1979.

Cuadro 6.3 Frecuencia acumulativas para totales de lluvia de un período de 80 días en la estación climatológica de Aldama, Gto. (Villalpando et al. 1984).

AÑO	TOTALES LLUVIA (PERIODO 80 DÍAS) (mm)	TOTALES DE LLUVIA ORDENADOS	NÚMERO DE ORDEN (m)	FRECUENCIA ACUMULATIVA (Fa)
1949	232	654	1	3.1
50	191	530	2	6.2
51	395	525	3	9.4
52	329	511	4	12.5
53	362	501	5	15.6
54	278	496	6	18.7
55	393	495	7	21.9
56	382	473	8	25.0
57	377	468	9	28.1
58	525	418	10	31.2
59	654	405	11	34.4
1960	501	399	12	37.5
61	171	395	13	40.6
62	330	393	14	43.7
63	250	382	15	46.9
64	495	377	16	50.0
65	511	362	17	53.1
66	266	359	18	56.2
67	530	330	19	59.4
68	405	329	20	62.5
69	182	318	21	65.6
1970	473	315	22	68.7
71	468	286	23	71.9
72	246	278	24	75.0
73	418	266	25	78.1
74	318	250	26	81.2
75	399	246	27	84.4
76	496	232	28	87.5
77	315	191	29	90.6
78	286	182	30	93.7
79	359	171	31	96.9

- b) Ordenar las observaciones del valor más grande al valor más pequeño.
- c) Asignar un número de orden, empezando con el número 1 para el valor más grande.
- d) Calcular la frecuencia acumulada para cada observación.
- e) Los valores se grafican (figura 6.5) y a partir de ésta gráfica se pueden calcular probabilidades:

ejemplo:

Conocer cual sería la probabilidad de recibir 400 mm o más durante el período crítico del maíz que comprende 80 días alrededor del jiloteo. Utilizando la gráfica de la figura 6.5 se encuentra la probabilidad de 38%. Es decir, que de cada 4 de cada 10 años para un período largo de tiempo la lluvia será igual o mayor que 400 mm para dicho período .

Distribución Normal (Método Gráfico).

Las probabilidades de lluvia también pueden ser calculadas empleando la distribución normal. Para calcular probabilidades mediante este método, se utiliza un papel gráfico especial denominado de probabilidad normal. Este método, además de servir para calcular probabilidades, sirve para probar en forma gráfica si el conjunto de datos sigue una distribución normal.

Para ilustrar el cálculo de probabilidades de lluvia y probar en forma gráfica si los datos utilizados siguen una distribución normal, se emplearán los mismos datos de lluvia de la estación climatológica de Aldama, Gto. para el período de 1949 a 1979, los cuales se presentan en el Cuadro 6.3.

Para graficar los datos de lluvia en el papel probabilístico normal, se utilizan las frecuencias acumulativas (F_a) correspondientes a cada uno de los valores de lluvia registrados en la serie histórica. Estos valores de F_a se encuentran tabulados en el Cuadro 6.3. A la distribución de puntos se les aproxima una línea recta la cual puede trazarse a ojo.

La figura 6.6 ilustra el procedimiento antes descrito. Al trazar la línea recta sobre los puntos observados se nota que las desviaciones de éstas observaciones sobre la línea son mínimas. Por lo que podría concluirse que los datos siguen una distribución normal y es correcto calcular probabilidades de lluvia usando la línea trazada para ello.

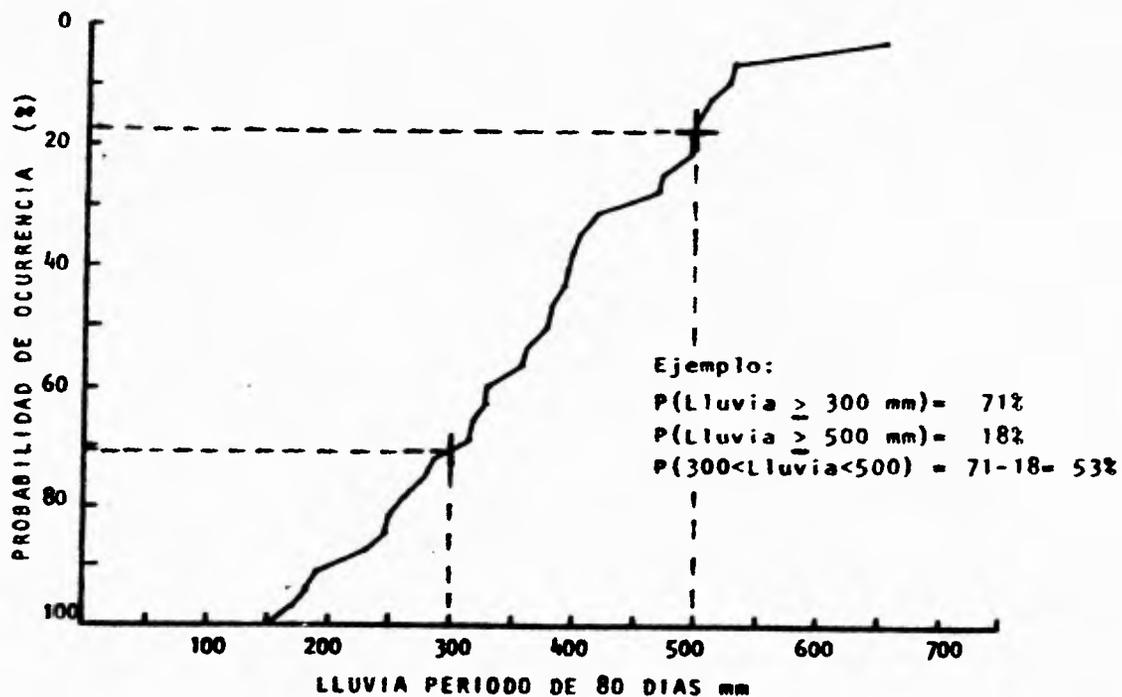


Figura 6.5 Distribución Acumulativa de lluvia para el periodo de 80 días (55 días antes y 25 días después del jiloteo del maíz) en Aldama, Guanajuato. (Villalpando, et al. 1984).

Por otro lado, una distribución de frecuencias asimétrica, donde los puntos sobre el papel probabilístico normal no siguen una alineación cercana a una línea recta puede deberse a: 1) Pocos datos disponibles, 2) datos sesgados por alguna interferencia física que cause consecuentemente sesgo, y 3) los datos de lluvia no se distribuyen normalmente, y por lo tanto no permiten sacar interferencias usando éste método.

Para contrarrestar la no-normalidad de los datos, se puede tomar la raíz cuadrada ó el logaritmo de los mismos datos de lluvia y graficar éstos nuevos valores sobre el papel probabilístico normal, y observar si los datos siguen una línea recta.

Para los periodos donde la precipitación es cero o cercana a cero para varios años se sugiere usar la fórmula siguiente:

$$g = p + (1-p) F_a$$

donde:

- g = Es la probabilidad de ocurrencia de lluvia para el período de récord completo de datos.
- p = Es la parte en la cual la precipitación registrada fue cero o cercana a cero.
- F_a = Es la Frecuencia acumulativa, definida anteriormente.

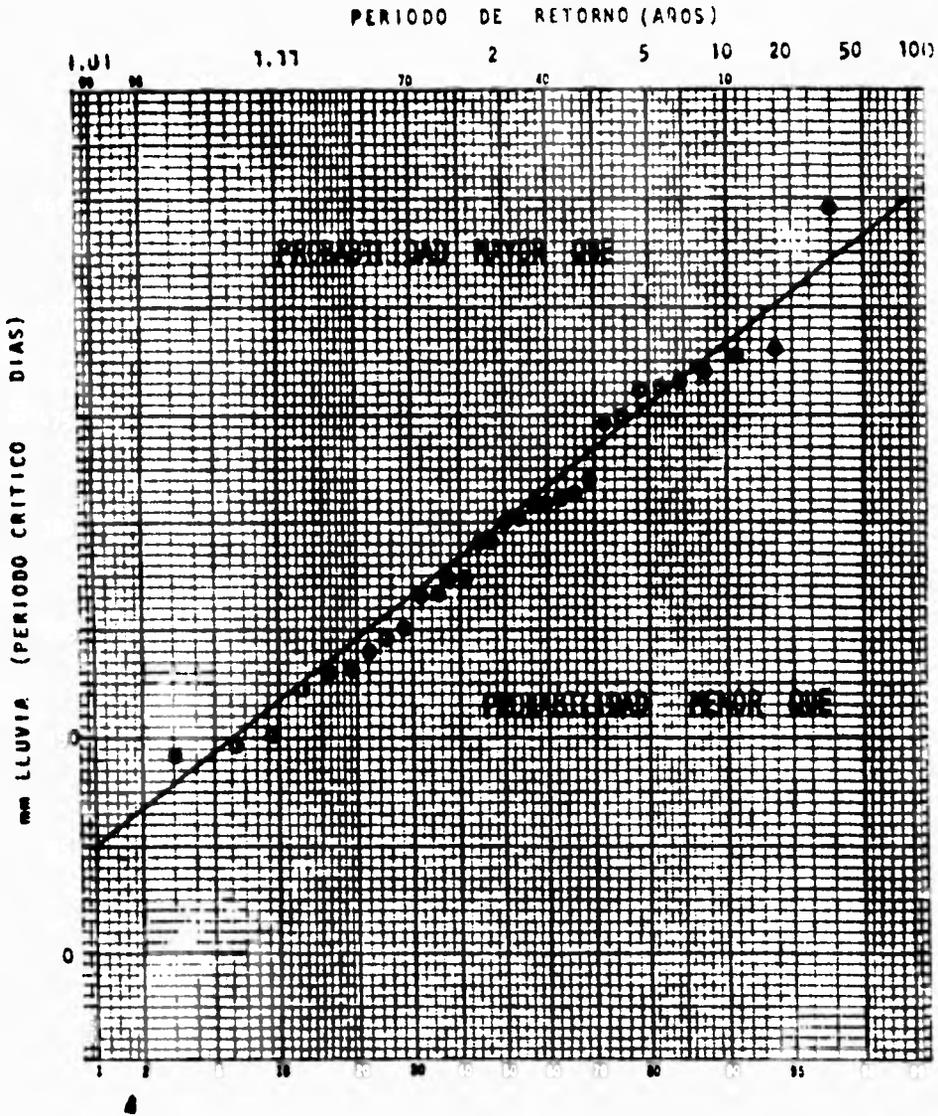


Figura 6.6 Cálculo de probabilidades de Lluvia mediante el uso de papel probabilístico normal.

Por ejemplo, si no se registró lluvia 4 de 6 años (4/6), $p = 0.25$. Luego, el valor de F_a se determina usando únicamente los 2 años restantes. Sin embargo, en estos casos se recomienda emplear la distribución gama incompleta para obtener resultados más confiables.

Distribución Gama Incompleta.

Esta distribución se ha usado comúnmente para calcular probabilidades de lluvia ya que se ha observado un buen ajuste a los datos observados (Thom, 1966).

La distribución gama es definida por su función de densidad de probabilidad como:

$$f(X) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} X^{\alpha-1} e^{-X/\beta}$$

donde:

X = Es la variable lluvia.

β = Es un parámetro que da la escala de X

α = Es un parámetro que da la forma de la curva.

$\Gamma(\alpha)$ = Es la función gama de α

e = Es igual a 2.7183 (base de los logaritmos naturales)

Tanto β como α son parámetros positivos ($\beta > 0$ y $\alpha > 0$)

Para ajustar esta distribución a un conjunto de datos es necesario estimar los parámetros β y α . Empleando el método de máxima verosimilitud (Thom, 1966) se calcula como sigue:

$$\hat{\alpha} = (1 + \sqrt{1 + 4y/3}) / 4$$

donde:

$$y = \ln \bar{X} - \frac{\sum \ln x}{n}$$

$$\hat{\beta} = \alpha / \bar{X}$$

La función de distribución de la cual se puede calcular probabilidades es:

$$P_X (X) = \int_0^X \beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x} / (\alpha) dx$$

Para facilitar el cálculo de probabilidades de lluvia la función de distribución gama incompleta se encuentra graficada en un monograma (Figura 7A del anexo). Este monograma fue preparado por el climatólogo H.C.S. Thom en 1951 (citado por Barger y otros, 1959), y está basado en las tablas de Pearson de la distribución gama incompleta (Pearson, 1934).

Para entrar a este monograma se necesitan calcular primero X/B donde X es la cantidad de lluvia la cual queremos conocer su probabilidad. El otro elemento para entrar a este monograma es el valor de α .

ejemplo:

El Cuadro 6.4 presenta los valores de precipitación registrados y sus logaritmos naturales durante un periodo de 80 días en la estación de Aldama, Gto., para el periodo de 1940 a 1979. Para calcular α y β se procede como sigue:

$$\hat{\alpha} = \frac{(1 + \sqrt{1+4y/3})}{4y}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{(1 + \sqrt{1+1.333 y})}{4y}$$

$$y = \ln x - \frac{\sum \ln x}{n}$$

$$y = 5.9193 - (5.8669) = 0.0524$$

$$\hat{\alpha} = \frac{(1 + \sqrt{1+1.333(0.0524)})}{4(0.0524)}$$

$$\hat{\alpha} = 9.70$$

$$\beta = \bar{X}/\alpha = 372.2/9.70 = 38.37$$

Supongamos que queremos conocer la probabilidad de que llueva 300 mm ó menos durante el periodo de 80 días;
 $P (\text{Lluvia} < 300 \text{ mm})$.

Los valores de X^2/β y $\hat{\alpha}$ son:

$$X^2 = 2\beta X$$

$$X^2/\beta = 300/38.37 = 7.82$$

$$\hat{\alpha} = 9.7$$

Con los valores de $X/B = 7.82$ y $\alpha = 9.7$ se entra al monograma del anexo (Figura 7A) y se encuentra una probabilidad aproximada del 29%. Esto quiere decir que 3 de cada 10 años se tendrá una lluvia igual o menor a 300 mm para el período mencionado de 80 días. Expresado esto de otra forma, podemos decir que la lluvia para este período de 80 días será mayor de 300 mm en un 71%, ó sea 7 de cada 10 años.

Cuadro 6.4 Logaritmos naturales de los datos de lluvia registrados para ser usados en la distribución Gamma.

ORDEN	PRECIPITACION REGISTRADA X	$\ln X$
1	654	6.4831
2	530	6.2729
3	525	6.2634
4	511	6.2364
5	501	6.2166
6	496	6.2066
7	495	6.2046
8	473	6.1591
9	468	6.1485
10	418	6.0355
11	405	6.0039
12	399	5.9890
13	395	5.9789
14	393	5.9738
15	382	5.9454
16	377	5.9322
17	362	5.8916
18	359	5.8833
19	330	5.7991
20	329	5.7961
21	318	5.7621
22	315	5.7526
23	286	5.6560
24	278	5.6276
25	266	5.5835
26	250	5.5215
27	246	5.5023
28	232	5.4467
29	191	5.2523
30	182	5.2040
31	171	5.1417

$\bar{X} = 372.2$
 $\ln \bar{X} = 5.919$

$\Sigma \ln = 181.8731$
 $\bar{X} = 5.8669$

CAPITULO 7

EVAPORACION Y BALANCE HIDRICO

7.1 Introducción

Las pérdidas de agua, en forma de vapor (evaporación), por parte de la vegetación y de la superficie del suelo hacia la atmósfera constituyen lo que se denomina evapotranspiración.

Esta depende de una serie de factores: temperatura, viento, humedad del aire, tiempo de exposición a la radiación solar, tipo de suelo y especies vegetales instaladas en él.

Este conjunto de factores constituye un sistema, de forma que la más mínima variación en alguno de los factores supone una alteración en la evapotranspiración real.

Por esto, en agronomía se recurre a un concepto más teórico, pero no por ello menos útil, que es la evapotranspiración potencial (ETP), definida como la máxima pérdida posible de agua de un suelo y una vegetación dados, bajo unas condiciones climáticas determinadas, suponiendo que ese suelo tenga toda el agua que pueda retener y que las plantas necesitan. Puesto que el agua que una planta necesita proviene de la lluvia, aquélla tendrá suficiente agua siempre que el total de precipitación sea superior al de ETP.

De aquí la importancia de conocer esos datos para la agricultura con objeto de introducir las especies de plantas más adecuadas a cada suelo, o establecer modificaciones mediante la creación de sistemas de riego, drenaje, etc.

La agricultura que se practica bajo condiciones de temporal tiene como principal limitante la precipitación pluvial, tanto en cantidad como en distribución. La lluvia sin embargo, no siempre es el mejor parámetro para utilizarse en la caracterización de una región en cuanto a la disponibilidad de agua para las plantas. Un parámetro más preciso es la cantidad de humedad almacenada en el suelo, sobre todo en aquellas regiones donde existen suelos de profundidad variable (suelos someros y suelos profundos).

Una herramienta útil en el cálculo de la humedad del suelo es el balance de humedad del suelo, mediante su estimación es posible obtener índices de sequía o de exceso de humedad, los cuales son parámetros valiosos en la caracterización del potencial agroclimático de una región.

Otra utilidad que presentan los balances hídricos, es que mediante su cálculo se pueden estimar las necesidades de agua de los cultivos, así como el momento más oportuno para aplicar los riegos.

7.2 El agua en el suelo

El papel del agua en el suelo comienza en la formación o génesis de éste. Se inicia con la meteorización de la roca madre a través del impacto de las gotas de lluvia, sigue con la formación y ampliación de grietas en las rocas, el desmenuzamiento de piedras por arrastre y termina con la disolución química de los enlaces entre elementos constituyentes del material original. Posteriormente, el agua juega un papel preponderante en el ordenamiento selectivo de las partículas, según su tamaño y densidad.

El agua es el disolvente universal que permite reacciones químicas en el suelo. Actúa en la disolución de materiales (especialmente silicatos), por medio de la hidrólisis y de la liberación de cationes de hidrógeno (H); en la formación de nuevos minerales de arcilla (silicatos: caolinita, montmorillonita) y óxidos (F O , Al (OH) , SiO); así como, en la transformación de minerales primarios, especialmente micas (moscovita, clorita), en minerales de arcilla (ilita, montmorillonita) y, finalmente, en el lavado de los productos disueltos.

La disponibilidad de agua en el suelo es condición indispensable para la vida de las plantas, ya que el agua constituye entre el 85% y el 90% del peso fresco de los tejidos de crecimiento y es el medio imprescindible para la asimilación de los nutrimentos. Este elemento es a su vez esencial para la fotosíntesis y los procesos hidrológicos, como también es el vehículo por medio del cual se desplazan las sales y los gases, a través de las paredes celulares y del xilema de las plantas.

Las diversas formas en las que el agua se mueve dentro del suelo y la fuerza con que ésta se encuentra retenida son de vital importancia para la vida de las plantas. Es decir, más importante que la cantidad absoluta de agua presente en un suelo en un momento determinado es la disponibilidad de ella para las plantas, lo cual determina el potencial productivo de éstas.

En los climas tropicales, donde la radiación solar y la temperatura no son determinantes, lo que origina, en primera instancia la formación de una u otra comunidad vegetal es la cantidad de agua disponible. La Dinámica del agua en el suelo.

La Dinámica del agua en el suelo.

Del agua que precipita en un determinado lugar, una parte es interceptada por la cobertura vegetal y por la superficie del suelo y de aquí, posteriormente, evaporada; otra parte penetra a diferentes profundidades del suelo y otra escurre sobre la superficie de éste. Las proporciones de agua que siguen cada uno de éstos caminos varían con el tipo de cobertura, el tipo de suelo, la pendiente y la intensidad de la precipitación. La figura 7.1 presenta la situación descrita.

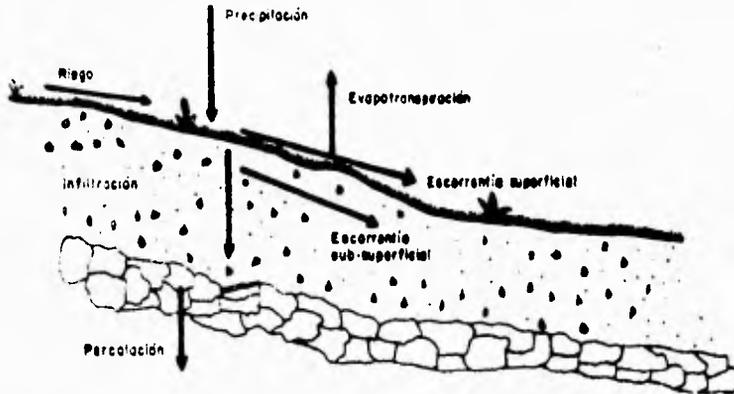


Figura 7.1. Componentes del movimiento del agua en el suelo.

La velocidad con que el agua penetra en el suelo (velocidad de infiltración) depende de la textura y estructura de éste, jugando un papel determinante la proporción de poros gruesos y finos y los pequeños canales hechos por organismos vegetales y animales. Otro factor importante en la velocidad de infiltración lo constituye el tipo de cobertura vegetal como se puede apreciar en el cuadro 7.1.

En su descenso por el interior del suelo, el agua satura en primer lugar aquella capa en la cual se desarrollan las raíces, fenómeno conocido como infiltración y luego sigue bajando por efecto de la gravedad, escapando al radio de acción de ellas. A esto último se le denomina percolación. Cuando, por diferentes razones, el agua no puede penetrar en el suelo fluye por la superficie. En este caso se habla de escorrentía superficial, por lo cual el agua desemboca en ríos o corrientes fluviales que se incorporan a lagos u océanos, desde donde el agua se evapora para reiniciar el ciclo.

Además de los movimientos descendentes descritos, existe en el suelo un movimiento de agua ascendente. Por

efecto de la evaporación , las capas superficiales del suelo pierden humedad y se desecan. Cuando las capas superficiales se desecan demasiado, succionan el agua de las capas más profundas, fenómeno conocido como ascenso capilar.

Cuadro 7.1. Infiltración del Agua en Terrenos con diferentes Coberturas.(Suárez de Castro, 1980).

Tiempo en minutos	Suelo cubierto de bosques, agua infiltrada (cm)	Suelo cubierto de pastos, agua infiltrada (cm)	Suelo sin cobertura vegetal agua infiltrada (cm)
5	60.0	21.0	5.3
10	119.0	45.8	11.0
30	360.0	127.0	35.5
60	715.0	250.0	63.0

En general, es de interés para el agricultor que la mayor cantidad posible del agua de precipitación penetre en el suelo (infiltración) y se almacene en aquella capa del suelo a la cual las raíces de las plantas tienen acceso. Si un suelo cubierto de plantas es saturado con agua de lluvia o de riego, al principio existe un movimiento intenso de agua hacia abajo; luego de un día o más, éste movimiento cesa porque la fuerza de succión ejercida por las partículas del suelo mantienen el agua alrededor de éstas.

La cantidad de agua que permanece en el suelo se denomina capacidad de campo y representa el agua que se encuentra disponible para la evapotranspiración. Periodos posteriores de evapotranspiración desplazarán esta agua y, si éste proceso se prolonga, el suelo quedará muy seco. Eventualmente, se llega a un estado donde la fuerza de succión ejercida por las partículas del suelo sobre el agua es igual a la máxima succión que una planta puede ejercer a través de sus raíces, por lo cual el suelo no puede contener más agua. A este estado se le conoce con el nombre de punto de marchitez permanente, dado que la planta al no poder abastecerse de agua se marchita y muere. El volumen de agua disponible entre la capacidad del campo y el punto de marchitez varía considerablemente según la textura del suelo. Con una misma cantidad de agua, los suelos arenosos alcanzan la capacidad de campo mucho más rápido que los suelos arcillosos. Estos últimos están en condiciones de almacenar mayores cantidades de agua que los suelos

arenosos, pero, al mismo tiempo, retienen una mayor proporción de agua bajo el punto de marchitez permanente.

En la figura 7.2 se gráfica las fuerzas con que las diferentes fracciones de agua (agua de infiltración, percolación, capacidad de campo, marchitez permanente) están retenidas en un suelo arenoso, en uno limoso y en uno arcilloso.

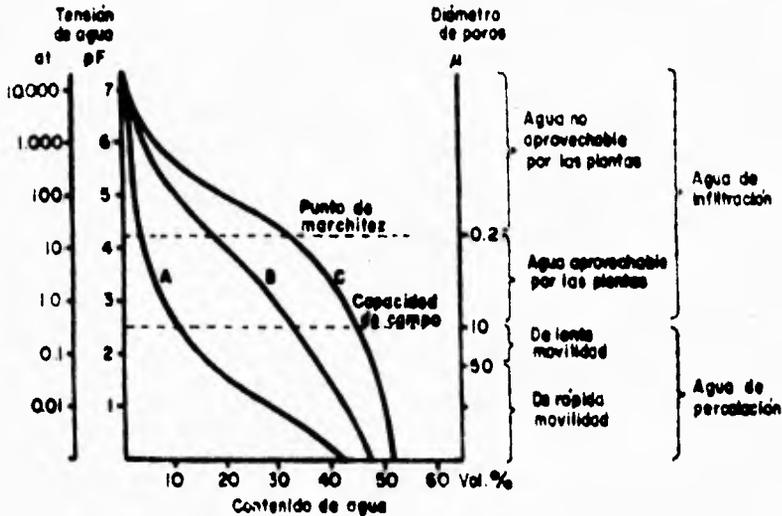


Figura 7.2. Curvas de tensión de un suelo arenoso (A), uno limoso (B) y uno arcilloso (C). (Schroeder, D., 1969).

La Evapotranspiración

El paso del agua del estado líquido al estado gaseoso se denomina evaporación. En el proceso de evaporación se requieren aproximadamente 600 calorías, o sea 2500 julios. La evaporación del agua libre de una superficie depende, en primer lugar, de la energía suministrada por la radiación neta y por el aire. Su valor aumenta con la intensidad de radiación y la temperatura del aire.

También es de gran importancia la humedad relativa del aire. La fuerza de succión de vapor por la atmósfera (déficit de humedad) es directamente proporcional a la tasa de evaporación. Con los vientos se renuevan permanentemente las masas de aire, desplazando de éste modo la humedad acumulada en éstas; por lo tanto, la velocidad del viento es otro elemento que incide sobre el proceso de evaporación.

Cuando las condiciones de sequía son extremas, las plantas cierran sus estomas y, finalmente, se desprenden de sus hojas para evitar, de ésta manera, la deshidratación.

A fin de formarse una idea aproximada de las cantidades de agua transpiradas por las plantas, es necesario saber que un metro cuadrado de superficie foliar puede evaporar un promedio de 50 mm de agua por hora. Así, una planta de maíz en su ciclo vital transpira cerca de 200 litros de agua, mientras que un árbol puede transpirar esta cantidad en un día. De esta manera, una hectárea de maíz, según Vives (1982), puede transpirar cerca de 3 000 000 de litros de agua en el período entre siembra y cosecha. Esto significa una precipitación de 300 mm.

Técnicamente es muy difícil medir los procesos de evaporación y transpiración por separado, dado que en la naturaleza suceden casi siempre conjuntamente, excepto sobre las superficies de lagos y océanos. Así, en áreas de tierra firme, toda el agua que pasa del suelo y de la vegetación a la atmósfera se debe a ambos procesos que, en conjunto, se denomina evapotranspiración. Este término incluye también la vaporización de las gotas de lluvia y rocío capturadas (interceptadas) por la superficie de las plantas.

Cuando no existe ninguna restricción a la evapotranspiración, se habla de evapotranspiración potencial (ETP), término que ha sido muy discutido y, después de varias modificaciones, se concibe como la evapotranspiración de una superficie extensa cubierta de hierba verde de 8 cm a 15 cm de altura, en fase activa de crecimiento que cubre completamente el suelo, en el que, en todo momento, existe la humedad suficiente para su uso máximo por esas plantas. La ETP representa la "demanda climática" y depende, ante todo, de las condiciones meteorológicas de cada lugar. También se le denomina evapotranspiración de referencia.

La evapotranspiración máxima (ETM) es el valor máximo de evapotranspiración de un cultivo u otra vegetación determinada en un estado vegetativo definido, y con una disponibilidad de humedad en el suelo suficiente para el uso máximo por las plantas; se denomina también necesidad de agua del cultivo o vegetación. Se pueden usar coeficientes de cultivo (K_c) para relacionar la ETP con la ETM:

$$ETM = K_c \times ETP$$

K_c varía con cada cultivo y con su etapa de desarrollo.

La evapotranspiración real (ETR) se define como la evapotranspiración de un cultivo u otra vegetación bajo las condiciones ambientales existentes. Ello indica que el suministro de agua puede ser limitado por restricciones de carácter físico (ejem. regulación estomática), lo cual reduce la transpiración con respecto al valor que ésta podría alcanzar en ausencia de la restricción. La ETR siempre es menor o igual que la ETM. Sólo en casos excepcionales, en los trópicos húmedos y muy húmedos, es decir, allí donde la precipitación excede al consumo, los valores de la evapotranspiración alcanzan casi los valores de la evapotranspiración máxima. Siempre queda retenida alrededor del 1% del agua en los tejidos de la vegetación.

Escorrentía

Como se explicó anteriormente, la fracción del agua recibida por un ecosistema que no se evapora directamente y que por diversas razones no logra penetrar el suelo, escurre en el sentido de la pendiente. En los casos en los que el agua penetra en las capas inferiores de la superficie del suelo, puede producirse escorrentía subsuperficial si el agua se encuentra con una capa impermeable.

Desde un punto de vista práctico, la escorrentía superficial, adquiere una importancia relevante, ya que, según el caso, ésta puede constituirse en un importante agente de erosión.

Cuando el suelo se satura rápidamente, las lluvias muy intensas pueden ocasionar considerable escorrentía aún en áreas con pendientes suaves. Los valores dependerán de la porosidad del suelo, de su contenido de humedad, de la intensidad de la lluvia y de la cobertura del suelo.

La intensidad del aguacero es el factor pluviométrico más importante que afecta a la escorrentía y, con ello, a la erosión. Aguaceros similares en cantidad total de agua caída, causan pérdidas muy diferentes de suelo y de agua, en relación directa con la intensidad de lluvias, como puede verse en el cuadro No. 7.2.

Cuadro 7.2. Relación entre Precipitación, Intensidad y Escorrentía. (Suárez de Castro, 1980).

Precipitación Total	Intensidad Máxima en 5 min.	Escorrentía
22.0 mm	1 mm	0.2 mm
20.6 mm	9.7mm	17.72 mm

El cuadro indica que, en el segundo caso, las pérdidas de agua por escorrentía superficial son mayores que el primer caso a pesar de que la precipitación total es menor, debido a que la intensidad máxima, medida en cinco minutos, supera a la primera en unas ocho veces.

La duración del aguacero influye sobre los valores de escorrentía tanto como la lluvia de intensidad uniforme sobre un suelo. El agua se infiltra durante un lapso más o menos largo según sean las condiciones de humedad del suelo y la intensidad de la lluvia; luego comienza la escorrentía, la cual va aumentando hasta alcanzar su volumen estable, que corresponde al total de la precipitación.

La frecuencia de las lluvias es otro factor que interviene en la escorrentía, al afectar a las condiciones de humedad de los terrenos. Si los intervalos entre lluvias son cortos, el contenido de humedad del suelo es alto al comenzar aquellas y aumentan los riesgos de que se originen escorrentías, aún con lluvias de baja intensidad. Si por el contrario, los periodos entre lluvias son largos, el suelo estará seco y no habrá escorrentía con aguaceros de baja intensidad. En Chinchiná (Colombia), se determinó que, en un periodo de ocho años, el 10% de los aguaceros fueron los responsables del 89% de las pérdidas de suelo. Ese número escaso de aguaceros aportó el 35% del agua caída y se caracterizó por ser de larga duración y alta intensidad y ocurrió cuando lluvias anteriores habían elevado el contenido de humedad del suelo, reduciendo, por lo tanto, su capacidad de infiltración.

Aunque entre dos zonas, los factores pluviométricos se mantengan constantes, los valores de infiltración varían con los factores topográficos y edáficos, es decir, con características tales como la pendiente del terreno, la textura, estructura del suelo y otros. El agua fluye más rápidamente a medida que aumenta la pendiente de un terreno y, por lo tanto, el tiempo de infiltración es menor. La longitud de una ladera es tan importante como su pendiente,

especialmente en terrenos bajo laboreo continuo. Al saturarse el suelo, el volumen del agua que escurre se hace cada vez mayor a todo lo largo de la ladera, aumentando su velocidad y, por lo tanto, los daños que produce.

De modo general, el tamaño de las partículas del suelo determina la magnitud del espacio poroso y, tanto aquél con ésta, la rapidez de absorción de agua. Un suelo con espacios porosos grandes, por ejemplo arenoso, durante una lluvia leve absorbe toda el agua que recibe sin originar corrientes superficiales y, por lo tanto, sin generar erosión. Sin embargo, como posee baja proporción de partículas arcillosas que actúan manteniendo y ligando las partículas gruesas, al fluir cualquier corriente de agua sobre su superficie, arrastra grandes cantidades de suelo.

Los suelos arcillosos con espacios porosos muy pequeños presentan características opuestas; durante una lluvia normal, debido al reducido tamaño de sus espacios porosos, gran parte del agua no penetra en el terreno sino que escurre superficialmente. Su capacidad de retención de agua es grande y mayor la resistencia a la acción desintegradora de las corrientes superficiales.

La cubierta vegetal de un suelo juega un papel preponderante sobre la relación entre la infiltración y la escorrentía superficial y, por ende, tiene gran importancia sobre la economía hídrica y la protección del suelo, especialmente en climas de alta precipitación.

De todos los efectos que causa la vegetación, los más notables son los relacionados con el aumento de la infiltración y de la protección contra el impacto directo de las gotas de lluvia.

Cuando una gota de lluvia golpea una superficie cubierta con una vegetación densa, se rompe en minúsculas gotitas de agua que penetran fácilmente en los innumerables intersticios y canales de suelo; cuando esa gota golpea un suelo desnudo, la fuerza del impacto desprende partículas que quedan en suspensión y, a medida que el agua se infiltra, se deposita en los espacios porosos del suelo, obstruyéndolos y dificultando el paso posterior del agua, la cual se ve obligada a fluir sobre la superficie del terreno.

Las raíces de la vegetación penetran a diferentes profundidades del suelo y cuando se descomponen por muerte de las plantas dejan numerosas cavidades tubulares que aumentan la infiltración y mejoran la aereación del suelo. Esta acción se ve aumentada por la actividad de los organismos que viven en mayor número en suelos provistos de vegetación.

La materia orgánica desempeña un importante papel en la capacidad del suelo para retener humedad. Dicha materia tiene mayor capacidad de absorción y retención de agua que la porción mineral del suelo y, por otra parte, ayuda a la formación de agregados estables a la acción del agua, que aumentan la permeabilidad y porosidad de los terrenos y mejoran su estructura. En diferentes estudios experimentales se evidencia hasta un 50% de reducción en la escorrentía debido a la incorporación de residuos vegetales al suelo. Además, en experimentos realizados con lluvia artificial sobre 44 tipos de suelos diferentes, el contenido de materia orgánica del suelo fue la variable más correlacionada con la disminución de la escorrentía.

7.3 El Balance Hidrológico

El Balance Hidrológico es la evaluación cuantitativa de la economía hídrica en un lugar y tiempo determinados. Permite establecer cuantitativamente los recursos de agua existentes y, por tanto, planificar su utilización tanto para la agricultura como para los otros diversos usos que el hombre hace de ella.

$$\boxed{\text{Agua que entra a un sistema}} = \boxed{\text{Agua que sale}} + \boxed{\text{Cambio en almacenamiento}}$$

Este balance se puede establecer para diferentes períodos (días, semanas, meses, estaciones o años) y puede cubrir diferentes extensiones territoriales, tales como una parcela, la cuenca de un río, un país o un continente. El balance puede aplicarse a su vez a un sistema completo; por ejemplo, al sistema atmosférico o sólo a una parte de un sistema, por ejemplo, el balance del agua en el suelo. Con el fin de calcularlo, es necesario realizar un análisis de las entradas y de las salidas.

Por ejemplo, al realizar el balance hidrológico de un lago es necesario conocer las entradas o aportes de agua al lago (lluvia y ríos que lo alimentan y sus egresos o pérdidas (desagües y ríos que se alimentan de él, y las pérdidas por evaporación). Para calcular el balance entre entradas y salidas se pueden hacer mediciones directas ó aplicar diferentes fórmulas que representen las diversas fracciones del agua total del sistema. En cada caso estudiado habrá ciertas incógnitas difíciles de despejar como, por ejemplo, la magnitud del agua subterránea que entra y sale de un lago. En estas situaciones se establecen factores de corrección o según el caso, se desprecian estos valores por suponerse muy pequeños. En otros, será posible despejar el valor desconocido como una incógnita de la ecuación.

Las fórmulas de cálculo del balance hidrológico se basan en el principio de conservación de masas, según el cual las variaciones de un volumen de agua cualquiera en un momento dado deben reflejar la diferencia entre las entradas y salidas de agua a dicho volumen. Por lo tanto, es necesario medir el agua almacenada y los flujos de entrada y salida.

Una de las dificultades más grandes en el cálculo del balance hidrológico es la medición de la evapotranspiración. La evapotranspiración potencial se puede registrar por medio de evaporímetros de diferentes tipos o calcular mediante fórmulas empíricas.

Sin embargo, en el balance hidrológico, se necesita conocer con precisión la evapotranspiración real, que generalmente difiere de la potencial. La dificultad de su medición o cálculo directo estriba en que posee diferentes componentes que varían según el tipo de vegetación, las formas de manejo y las características del suelo. Debido a ello, es aconsejable separar los componentes del balance hidrológico (precipitación, intercepción, infiltración, escorrentía, evapotranspiración) y medirlos individualmente para así obtener una mejor aproximación a la realidad.

Naturalmente es posible despejar como incógnita cualquiera de los términos de la ecuación del balance hidrológico si los otros términos son conocidos. Esto presupone en casi todos los casos mediciones exhaustivas y observaciones por largos periodos para llegar a obtener valores confiables. Para efectos prácticos, es decir, de planificación y programación de actividades agrícolas, se deben considerar aspectos como el inicio y la distribución de las lluvias, y la presencia de días consecutivos secos.

7.4 Estimación de balances hídricos

La agricultura que se practica bajo condiciones de temporal tiene como principal limitante la disponibilidad de agua, tanto en su cantidad como en su distribución. De allí que sea de gran importancia tanto para la planeación de la investigación como para el conocimiento de la región saber cual es la disponibilidad de agua. Sin embargo, para llegar a este conocimiento nos enfrentamos a una serie de carencias como son la falta de observaciones en la variación de la humedad del suelo durante el ciclo del cultivo, o en todo el año.

Una herramienta útil para lograr el propósito mencionado es el balance hídrico, ya que mediante su estimación es posible obtener índices de sequía o de exceso de humedad o bien detectar una condición de equilibrio,

dependiendo del tipo del suelo y del clima. Otra utilidad que presentan los balances hídricos es que mediante su cálculo se pueden estimar las necesidades de agua de los cultivos.

La información disponible en las estaciones climatológicas del área de influencia de los Campos Agrícolas Experimentales permiten que éste tipo de estudios se puedan realizar en su totalidad y ello proporcionaría la información que permita caracterizar la región por su disponibilidad de humedad.

7.5 Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) y balance hídrico

A través de los años, muchos investigadores han trabajado sobre el problema de como expresar el balance hídrico para un determinado lugar, ya sea a nivel diario o estacional. En la década de los cuarenta los estudios hechos por C.W. Thornthwaite en los Estados Unidos, H.L. Penman en Inglaterra y M.I. Budiko en Rusia contribuyeron en forma significativa en esta área de estudio. Estos investigadores sentaron las bases científicas sobre las cuales ellos y otros científicos se han apoyado para desarrollar métodos más precisos para estimar el balance hídrico de un lugar o región específicos (Mather, 1974).

Penman (1956) definió evapotranspiración potencial (ETP) como "la cantidad de agua transpirada en una unidad de tiempo por un cultivo de porte bajo, cubriendo completamente el suelo, de altura uniforme, sano y sin limitaciones de agua". De acuerdo con esta definición, la ETP de cultivos que cubran completamente el suelo y bien abastecidos de humedad depende principalmente de factores climáticos, siendo secundarios los factores de suelo y planta (Hillel, 1980). La ETP vista como la demanda atmosférica de agua, está en función de la radiación solar, viento, humedad ambiental y temperatura, siendo la radiación solar el factor más importante (Shaw, 1977).

Shaw (1963) desarrolló un método para determinar el balance de humedad a nivel diario. Este método fue adoptado para estimar la humedad del suelo cuando éste se cultiva con maíz. Además de estimar el contenido de humedad para estratos de 15 cm. hasta profundidad radical, éste método estima también el escurrimiento y la percolación y un índice de sequía a nivel diario. Los elementos necesarios para correr éste programa de simulación de humedad son datos de clima, suelo y de planta, (precipitación y evaporación diarias, humedad del suelo inicial, humedad aprovechable, profundidad radical del maíz, fecha del 75% de jilotea del maíz, coeficiente del cultivo, Kcr, coeficiente de

transpiración y coeficiente de escurrimiento). Los factores de planta y suelo deberán determinarse bajo condiciones locales para obtener mejores resultados, como lo apunta el propio autor.

Bailer y Robertson (1965) mencionan que se puede estimar diariamente la humedad existente en el suelo y en varias profundidades del mismo, haciendo uso de datos meteorológicos estandar. Estos investigadores trabajando en el cultivo del trigo en Ottawa, Canadá encontraron que empleando conceptos básicos utilizados en un modelo tradicional, tales como relacionar la evapotranspiración potencial con evapotranspiración actual, y por otra parte subdividiendo el total de humedad aprovechable en el suelo en varias zonas de diferentes capacidades, se facilita el proceso de cuantificar la humedad en el perfil radical de cultivo.

Estos autores mencionan además, que el balance que utilizaron realiza algunos ajustes para agua excedente, drenaje, curvas de tensión de humedad del suelo y efectos de diferentes valores de demanda atmosférica, en la relación de evapotranspiración (actual y potencial), en base a un programa de computadora utilizado.

Shaw y Burrows (1966) comentan en relación al balance hídrico que cuando el abastecimiento y el uso ó consumo de humedad se consideran juntos se obtiene un balance de agua. Estos autores han manejado tal relación de manera estacional específicamente en el cultivo del maíz y han encontrado que durante el período inicial de la estación la cantidad de agua que llega al cultivo es mayor que las demandas exigidas por él, creándose reservas de humedad que puedan ser particularmente importantes para abastecer las necesidades del cultivo en períodos subsiguientes.

Baier (1967) realizando estudios para estimar la humedad del suelo, usando la información climática encontró que es posible estimar la evapotranspiración potencial y el contenido de humedad del suelo desarrollando modelos de regresión. Este investigador utilizó tres modelos en los que se involucraba los coeficientes de cultivo, pero en unos de ellos realizó una modificación tomando en cuenta la profundidad radical, siendo éste el que mayor ajuste tuvo con las observaciones directas. Este autor concluye que para realizar un balance hídrico es necesario considerar los puntos críticos de consumo de agua en el suelo.

Tanner (1967) dividió los métodos existentes en tres tipos:

- 1) Métodos hidrológicos o de balance hídrico,
- 2) Métodos micrometeorológicos, y

3) Métodos empíricos.

Los métodos de balance hídrico (incluyendo lisímetros) y los métodos micrometeorológicos están diseñados para medir evapotranspiración real, mientras que los métodos empíricos estiman la ETP, ya que estos están fundamentados únicamente sobre variables climatológicas estandar. Los métodos empíricos generalmente se usan sobre regiones geográficas grandes donde se requiere de estimaciones de ETP para la planeación agropecuaria principalmente.

Chang (1968) asevera que el rápido progreso en los estudios para estimar la evapotranspiración ha generado buenas técnicas en el cálculo del balance hídrico, como para considerarlo como método para estimar la humedad del suelo, el cual es muy recomendable por cuestiones como: bajo costo del equipo, simplicidad en las mediciones y una razonable precisión en los resultados.

Este mismo autor menciona que el balance hídrico puede ser computado a nivel diario utilizando los siguientes factores: precipitación, evapotranspiración potencial, evapotranspiración actual, almacenamiento o reservas de humedad, exceso y déficit; y en los cultivos de riego se debe incluir el agua aplicada (lamina de riego).

De Fina y Ravelo (1973) mencionan que cuando se toma únicamente la precipitación no permite caracterizar una zona por su disponibilidad de humedad, sino que es necesario hacer un balance hídrico, es decir, realizar una suma algebraica de la entrada y salida de agua del suelo.

Al efectuar la suma, las entradas de agua al suelo se consideran con signo positivo y las salidas con signo negativo, tienen signo positivo las precipitaciones y el agua de escurrimiento que llega desde las partes más elevadas del terreno, y poseen signo negativo la evapotranspiración, el agua que se pierde por escurrimiento hacia las partes más bajas del terreno y el exceso de agua del suelo que se percole a capas más profundas del suelo. Además, éstos autores mencionan que el balance hídrico tiene su aplicación en estudios de disponibilidad hídricas regionales, aprovechamiento del agua edáfica en los períodos más convenientes, la ubicación de cultivos según sus exigencias hídricas, momento oportuno de riego, etc.

Jensen (1973) realizó una evaluación de varios métodos para estimar ETP desde el punto de vista de precisión y elementos climáticos necesarios para su cálculo. Este autor concluyó que no existe un método universal que sea adecuado bajo todas las condiciones climáticas, y que el método seleccionado dependerá de los datos meteorológicos disponibles, del entrenamiento y experiencia del usuario, así como de la precisión requerida en las estimaciones.

Doorenbos y Pruitt (1976) definen la ETP "es la evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 cm. de altura, uniforme, de crecimiento activo, que sombrean totalmente el suelo y que no presentan déficit de agua". En el Proceso evapotranspirativo de las plantas, intervienen tres tipos de factores: factores climáticos, factores de la planta y factores de suelo.

Pascale y Damario (1974) han manejado el balance hidrológico seriado (BHS) en estudios agroclimáticos. El balance hidrológico seriado (BHS) que éstos investigadores manejaron consistió en aplicar consecutivamente mes a mes el cómputo usual del balance de agua a los valores meteorológicos mensuales de evapotranspiración potencial (ETP) y precipitación (P) registrados a través de una serie continua de 30 años ó más.

Por cada elemento del balance y para cada mes del año, se dispondrá de una serie con tantos términos como años considerados, cuyo tratamiento matemático permite conocer las características de su distribución y variabilidad, así como calcular la probabilidad estadística de ocurrencia de situaciones hídricas particulares. Todo lo anterior resulta de innegable utilidad e importancia en estudios agroclimáticos referentes al régimen hídrico en el suelo. Además la posibilidad de aplicar tratamiento estadístico a los componentes del balance hidrológico seriado (BHS) permite recomendar su utilización en estudios agroclimáticos cuyo objetivo sea cuantificar la aptitud productiva agropecuaria local y regional o establecer una zonificación y clasificación de agroclimas.

Da Mota (1977) trabajando en la región sur de Brasil se terminó un nuevo método de balance hídrico para propósitos agroclimatológicos. Este autor usó la evapotranspiración potencial estimada por el método de Penman pero adaptada a las condiciones climáticas de la zona, es decir, multiplicada por un factor de cultivo el cual estaba en función de estado de desarrollo del mismo. Asimismo, éste método involucra el valor probabilístico del 80% de precipitación mensual segura, esto de acuerdo con una función gama incompleta, y además también considera el valor de reducción de evapotranspiración inferior a la potencial causado por las limitaciones de la baja humedad del suelo. Este método contempla las deficiencias y excesos de humedad en la rotación de cultivos más importante de la región; la cual es trigo-soya.

Según **Palacios** (1981), los factores climáticos definen la demanda de agua; es decir, la energía solar es la fuerza evaporante que se manifiesta a través de los elementos del clima, como son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y el viento. Por otra parte, los factores de la planta y el suelo, establecen la oferta de

agua, esto es, la cantidad de agua que se evapora o transpira, dependerá de la cantidad almacenada en el suelo y de la facilidad con que puede extraerla la planta,

López, et al, (1989) realizaron la determinación de la evapotranspiración potencial promedio a lo largo de un año, seleccionaron once métodos, y encontraron que existe variación en los valores de evapotranspiración potencial obtenidos a partir de cada uno de los métodos utilizados. En promedio, los valores máximos de evapotranspiración potencial se encuentran entre los meses de marzo a junio. A partir del análisis de regresión se encontró que los métodos de evapotranspiración potencial que presentan mejor ajuste son: Christiansen, Turc y Jensen-Haise.

Las variables climáticas analizadas fueron:

Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)
 Temperatura máxima promedio ($^{\circ}\text{C}$)
 Temperatura mínima promedio ($^{\circ}\text{C}$)
 Evaporación total mensual (mm)
 Precipitación total mensual (mm)
 Humedad relativa media mensual (%)
 Humedad relativa mínima extrema (%)
 Radiación global (W/m^2)
 Brillo solar (Hr-Min)
 Velocidad del viento (m/s)

Los Métodos empíricos empleados en el cálculo fueron:

- a. Métodos combinados:
Método de Penman modificado.
- b. Métodos de radiación:
Método de Turc.
Método de Jensen-Haise.
- c. Métodos de evaporación:
Método del tanque de evaporación.
Método de García Benavides.
- d. Métodos de Temperatura:
Método de Thornthwaite.
Método de Blaney-Criddle.
- e. Métodos de humedad:
Método de David.
Método de Papadakis.
- f. Métodos de correlación múltiple:
Método de Christiansen-Heargraves.
Método de Christiansen.

Al analizar los resultados de los meses críticos en cuanto al registro de valores altos de evapotranspiración potencial, se dio lo siguiente:

Método	Mes crítico
Penman	mayo y agosto.
Turc	mayo, agosto y octubre.
Jensen-Haise	mayo, agosto y octubre.
Tanque de evaporación	marzo, agosto y octubre.
García	marzo, agosto y octubre.
Thornthwaite	mayo.
Blaney-Criddle	mayo.
David	junio.
Papadakis	abril, agosto y noviembre.
Christiansen-Heargraves	marzo, mayo, agosto y octubre.
Christiansen	mayo y julio.

Estos autores recomiendan los métodos que requieren de variables fáciles de obtener, como lo son la temperatura y la evaporación, en virtud de la dificultad que presentan las demás variables climáticas (velocidad del viento, radiación global y humedad relativa, etc.)

Además comentan que es arriesgado emplear un método en un clima distinto a aquel lugar en el cual fue obtenido, y para la selección de un método específico es necesario tomar en consideración un punto de referencia para su comparación, por ejemplo un método directo para el cálculo de la evapotranspiración lo es el método lisimétrico.

Es así como en base a los métodos más importantes se han definido los siguientes conceptos y definiciones para la evapotranspiración:

Evaporación. Se define como la tasa de pérdida de agua de la fase líquida a la fase gaseosa de una superficie abierta de agua o suelo húmedo a través de procesos físicos, se mide en mm/día.

Transpiración. Se define como la tasa de pérdida de agua a través de una planta, la cual es regulada por procesos físicos y fisiológicos, se mide en mm/día.

Evapotranspiración (ET). Es la tasa de pérdida de agua de la planta por transpiración más la evaporación del suelo, se mide en mm/día.

Evapotranspiración Potencial (ETP) Es la tasa de ET de un cultivo de altura uniforme, sano y que cubra completamente el suelo y sin limitaciones de humedad en el suelo

Evapotranspiración Real (ET_r). Es la tasa de ET igual o más pequeña que la ETP, la cual es afectada por el nivel de humedad disponible del suelo, salinidad, tamaño del campo de cultivo, etc.

Evapotranspiración del Cultivo (ET_c). Es la tasa de ET para un cultivo creciendo sano bajo condiciones óptimas de suelo. La ET_c incluye pérdida de agua por transpiración y por evaporación del agua del suelo y de las hojas del cultivo. $ET_c = ETP \times K_c$, donde K_c es el coeficiente de cultivo el cual varía dependiendo de la etapa de desarrollo de la planta.

7.6 Metodologías para estimar los componentes del balance hídrico

Componentes del Balance Hídrico.

Los componentes para calcular el balance hídrico, básicamente son: precipitación y/o irrigación, evapotranspiración, capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, percolación y escurrimiento.

A. Precipitación, Irrigación, Percolación y Escurrimiento.

Los componentes precipitación y/o irrigación pueden medirse sin problema. La cantidad de agua percolada a capas profundas del suelo y aquella pérdida por escorrentía pueden medirse directamente, aunque en estudios a nivel regional éstos pueden estimarse por diferencia.

B. Capacidad de Almacenamiento de Humedad del Suelo.

La capacidad de retención de humedad del suelo puede ser estimada directa o indirectamente. Los métodos para su estimación se pueden dividir en tres grupos: 1) Método de laboratorio, 2) Método de campo y 3) Componentes de textura.

1. Método de Laboratorio.

Para estimar la capacidad de retención de humedad por este método, primero se determinan las constantes de humedad del suelo, que son la capacidad de campo (CC) y el por ciento de marchitez permanente (PMP). La C.C. se determinan sometiendo una muestra de suelo alterada a 0.3 atmósferas de tensión y se calcula su por ciento de humedad. El P.M.P. por su parte se determina sometiendo la muestra de suelo a 15 atmósferas de tensión, y también se calcula el por ciento de humedad del suelo a ésta tensión.

La humedad aprovechable (H.A.) del suelo resulta de la diferencia entre C.C. y P.M.P. es decir:

$$H.A. = C.C. - P.M.P.$$

Para conocer la lámina de agua que un suelo es capaz de almacenar, se calcula con la siguiente ecuación:

$$L.A. = H.A. \times Da \times Prof.$$

donde:

L.A. = Lámina de agua aprovechable (en cm)
 H.A. = Humedad aprovechable (en %)
 Da = Densidad aparente (gr/cc)
 Prof. = Profundidad radical (en cm)

ejemplo:

Supongamos los siguientes datos en el cálculo de la capacidad de almacenamiento de humedad de suelo:

C.C. = 40% = .40
 P.M.P. = 22% = .22
 Da = 1.3 gr/cc
 Prof. = 100 cm

substituyendo los datos en la ecuación tenemos:

$$L.A. = (.40 - .22) \times 1.3 \times 100$$

$$L.A. = 23.4 \text{ cm} = 234 \text{ mm}$$

2. Método de Campo.

La capacidad de almacenamiento de agua de suelo a profundidad radical, puede estimarse directamente en el campo. En la mayoría de los suelos éste valor se obtiene llevando el suelo a condiciones de saturación (mediante agua de lluvia o riego) y dejando drenar el exceso de agua (agua de gravitación) por un período que varía de 2 a 4 días. Después de este lapso de tiempo, inmediatamente se determina el contenido de humedad del suelo. El valor encontrado será el correspondiente a capacidad de campo.

3. Componentes de Textura.

Los componentes de textura: arena, limo y arcilla puede emplearse en forma indirecta en la estimación de la

capacidad del almacenamiento de humedad. Villalpando (1983) trabajando con datos de textura, C.C. y P.M.P. determinados para 76 perfiles de suelo de El Bajío, obtuvo a partir del % de arcilla las siguientes ecuaciones para obtener C.C. y P.M.P.:

$$\begin{aligned} \text{C.C.} &= 8.56 + 0.671 (\% \text{ Arcilla}) \\ \text{P.M.P.} &= 2.17 + 0.432 (\% \text{ Arcilla}) \end{aligned}$$

Con la C.C. y el P.M.P. se obtiene la H.A. y luego la lámina de agua que puede almacenar el suelo a una determinada profundidad.

ejemplo:

Supongamos los siguientes datos en el cálculo de la capacidad de retención de humedad de un suelo:

$$\begin{aligned} \% \text{ Arcilla} &= 35\% \\ Da &= 1.25 \text{ gr/cc} \\ \text{Prof.} &= 90 \text{ cm} \\ \text{C.C.} &= 8.56 + 0.671 (35) = 32.05\% = 0.32 \\ \text{P.M.P.} &= 2.17 + 0.432 (35) = 17.29\% = 0.17 \\ \text{H.A.} &= 0.32 - 0.17 = 0.15 \\ \text{L.A.} &= \text{H.A.} \times Da \times \text{Prof.} \\ (\text{Capacidad de Retención}) &= .15 \times 1.25 \times 90 \\ \text{L.A.} &= 17.55 \text{ cm} = 175 \text{ mm} \end{aligned}$$

C. Evapotranspiración.

Para estimar ETP existen varios métodos, los cuales varían en cuanto al número de elementos climáticos necesarios para estimar ETP (cuadro 7.3). A continuación se describen los métodos de: 1) tanque evaporímetro tipo A, 2) radiación solar y 3) Penman modificado, los cuales de acuerdo con Doorenbos y Pruitt (1977), son de los más recomendables para estimar ETP. Los dos primeros requieren pocos elementos climáticos para calcular valores de ETP, mientras que en el tercero un número mayor de componentes es necesario.

Método del Tanque Evaporímetro tipo A. La evaporación registrada en los tanques evaporímetros puede ser utilizada para estimar ETP, siempre y cuando se hagan ajustes. Doorenbos y Pruitt (1977) presentan una tabla (Cuadro 7.4) donde tales ajustes dependen del lugar de ubicación del tanque evaporímetro, así como de las condiciones climáticas imperantes durante el periodo para el cual se desea convertir la evaporación a ETP. Para reforzar esto, Shaw

(1982) considera que los tanques evaporímetros pueden ser buenos estimadores de la ETP bajo ciertas condiciones, tales como áreas geográficas grandes donde no es requerida una precisión alta en los valores estimados de ETP.

Cuadro 7.3 Diferentes autores y factores que usaron para la estimación de la evapotranspiración. (adaptado hasta 1972, de Chaves Fallas, 1973).

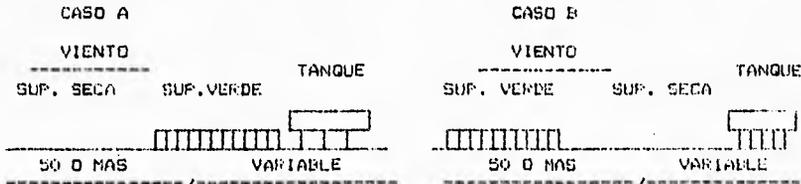
AÑO - AUTOR	FACTORES USADOS
1928 - Hedke	Calor disponible
1942 - Lowry y Jhonson	Calor efectivo
1942 - Blaney y Morin	Temperatura, humedad relativa, Duración del día.
1948 - Thornthwaite	Temperatura y Latitud
1950 - Blaney y Criddle	Temperatura y porcentaje de horas Luz.
1953 - Turc	Temperatura y Radiación
1956 - Hargreaves	Temperatura, humedad relativa, - duración del día.
1957 - Makink	Temperatura y Radiación.
1963 - Jensen y Haise	Radiación Solar
1964 - Grassi y Christiansen	Temperatura, Radiación, Nubosidad.
1965 - Brutsaert	Evaporación.
1966 - Hargreaves	Temperatura, Altitud, humedad relativa, viento, horas luz.
1970 - Penman (Combinada)	Temperatura, Radiación, viento.
1971 - Hargreaves	Temperatura, radiación, Humedad relativa, altitud, velocidad del viento.
1972 - Garcia y López	Temperatura, humedad relativa.
1976 - Morero A.	Evaporación y Precipitación.

Con estos datos se entra al Cuadro 7.4 (caso A) y se encuentra el valor de K_p , que en este caso es de 0.75. Entonces, la evaporación del tanque evaporímetro tendría que multiplicarse por 0.75 para transformarla a ETP.

Cuadro 7.4. Coeficiente (Kp) de tanque evaporimetro clase A para diferentes cubiertas de suelo, niveles de humedad relativa promedio y 24 horas de recorrido de viento (Doorenbos y Pruitt, 1977).

TANQUE CLASE A	CASO A TANQUE RODEADO DE CUBIERTA VERDE BAJA				CASO B TANQUE CON BARBECHO DE SECANO			
	BAJA <40	MEDIA 40-70	ALTA >70		BAJA <40	MEDIA 40-70	ALTA >70	
RH MEDIA%								
VIENTOS KM/DIA	DISTANCIA A BARLOVENTO DE LA CUBIERTA VERDE (EN M)				DISTANCIA A BARLOVENTO DEL BARBECHO DE SECANO (EN M)			
DEBILES 0-175	0	.55	.65	.75	0	.7	.8	.85
	10	.65	.75	.85	10	.6	.7	.8
	100	.7	.8	.85	100	.55	.65	.75
	1000	.75	.85	.85	1000	.5	.6	.7
MODERADOS 175-425	0	.5	.6	.65	0	.65	.75	.8
	10	.6	.7	.75	10	.55	.65	.7
	100	.65	.75	.8	100	.5	.6	.65
	1000	.7	.8	.8	1000	.45	.55	.6
FUERTES 425-700	0	.45	.5	.60	0	.6	.65	.7
	10	.55	.6	.65	10	.5	.55	.65
	100	.6	.65	.7	100	.45	.5	.6
	1000	.65	.7	.75	1000	.4	.45	.55
MUY FUERTES >700	0	.4	.45	.5	0	.5	.6	.65
	10	.45	.55	.6	10	.45	.5	.55
	100	.5	.6	.65	100	.4	.45	.5
	1000	.55	.6	.65	1000	.35	.4	.45

1./ PARA AREAS EXTENSAS DE SUELOS SIN CULTIVAR Y AGRICULTURA SIN DESARROLLO, SE REDUCE Kp EN 20% PARA CONDICIONES CALIENTES Y DE MUCHO VIENTO; DE 5-10% PARA CONDICIONES DE VIENTO, TEMPERATURA Y HUMEDAD MODERADAS.



Para ilustrar el uso del cuadro 7.4 se utilizara un ejemplo de Villalpando et al. (1984) usando los siguientes datos de localización de un tanque evaporímetro tipo A.

- a) Tanque evaporímetro colocado sobre la superficie con pasto corto.
- b) La distancia más cercana a la que se encuentra un cultivo alto (ejemplo 2.50 m), es aproximadamente 100 m.
- c) El promedio de humedad relativa para el período de interés es de 40-70%.
- d) El recorrido del viento en Km/día es moderado (175-425 km/día).

Método de Radiación Solar. Para calcular ETP se emplea la fórmula siguiente:

$$ETP = c (W \times RS)$$

donde:

- ETP = Evapotranspiración potencial en mm/día para el período considerado.
- Rs = Radiación Solar, equivalente en mm/día.
- W = Factor de ponderación, el cual depende de la temperatura y la altitud.
- c = Factor de ajuste, el cual depende de las condiciones promedio de humedad relativa (H.R.) y viento durante el día.

El cálculo de Rs a partir de la nubosidad o de la insolación ya fue mostrado anteriormente en el tema de radiación solar. Conociendo la altitud del lugar y la temperatura del período para el cual se desea estimar ETP, el valor de W se obtiene en la Tabla 10 A del anexo. El valor de c se obtiene de una gráfica de la cual se presenta de Figura 1A del anexo.

Ejemplo (Villalpando 1984): Para ilustrar la aplicación de esta fórmula, se utilizarán datos del observatorio meteorológico de Guadalajara, Jal.

Altitud = 1550 msnm
 Latitud = 20° 41' N

Temperatura media del mes de julio = 20.5°C

Humedad Relativa = Alta (> 70%)

Viento = Moderado (2 - 5 m/s)

Insolación (n) = 6.5 h/día

Ra = 16.3 (ver cuadro 7.5)

N = 13.2 (ver cuadro 7.6)

$$R_s = (0.29 + (0.42 n/N)) R_a$$

$$R_s = (0.29 + (0.42 \times 6.5/13.2)) \times 16.31$$

$$R_s = 8.10 \text{ mm/día}$$

Para obtener el valor de W se entra con la altitud 1550 msnm y la temperatura media del mes de julio, 20.5°C a la tabla 10A del anexo. Interpolando encontramos un valor aproximado de W = 0.72.

Luego:

$$\begin{aligned} \text{ETP} &= c (W \times R_s) \\ &= c (0.72 \times 8.10) \\ &= c (5.83) \end{aligned}$$

El valor de c (factor de corrección por humedad relativa y velocidad del viento) se obtiene de la figura 1A del anexo, en donde de acuerdo a nuestros datos se entra al cuadrante IV de dicha figura donde la Humedad Relativa > 70% y la recta No. 2 corresponde a viento diurno moderado (2 - 5 m/s). Interpolando en esta gráfica el valor de W Rs = 5.83 de la abscisa corresponde a un valor de ETP (en la ordenada) de aproximadamente ETP = 4.6 mm/día.

Método de Penman Modificado. Para estimar ETP por este método se usa la fórmula siguiente:

$$\text{ETP} = C \left((W \times R_n) + (1-W) \times F(u) \times (e_a - e_d) \right)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial en mm/día.

W = Factor de ponderación para temperatura y altitud.

Rn = Radiación neta, equivalente en mm/día.

F(u) = Función relacionada con el viento.

(ea-ed) = Déficit de saturación de vapor a temperatura media.

c = Factor de ajuste para compensar por el efecto de las condiciones de tiempo diurnas y nocturnas.

Cuadro 7.5 Duración media diaria de insolación máxima posible en horas (N), para diferentes meses y latitudes.

LATITUD NORTE	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEPT	OCT.	NOV.	DIC.
50°	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.6	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

Cuadro 7.6 Radiación solar sobre una superficie horizontal al límite de la atmósfera (Ra), expresado como mm de agua evaporable para una constante solar $2.00 \text{ cal. cm}^{-2}\text{min}^{-1}$.

<u>HEMISFERIO NORTE</u>												
LAT. N.	M E S E S											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAYO	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
32°	8.32	10.24	12.77	15.00	16.50	17.02	16.76	15.58	13.63	11.20	8.99	7.76
30	8.81	10.68	13.14	15.17	16.53	16.95	16.78	15.68	13.90	11.61	9.49	8.31
28	9.29	11.09	13.39	15.26	16.48	16.83	16.68	15.71	14.02	11.95	9.90	8.79
26	9.79	11.50	13.65	15.34	16.43	16.71	16.58	15.74	14.26	12.30	10.31	9.27
24	10.20	11.89	13.90	15.43	16.37	16.59	16.47	15.78	14.45	12.64	10.71	9.73
22	10.70	12.30	14.16	15.51	16.32	16.47	16.37	15.81	14.64	12.98	11.11	10.20
20	11.19	12.71	14.41	15.60	16.27	16.36	16.27	15.85	14.83	13.01	11.61	10.68
18	11.60	13.02	14.60	15.62	16.11	16.14	16.09	15.79	14.94	13.58	12.02	11.12
16	12.00	13.32	14.69	15.64	15.99	15.92	15.91	15.72	15.04	13.85	12.43	11.57
14	12.41	13.62	14.89	15.65	15.83	15.70	15.72	15.65	15.14	14.12	12.84	12.02
12	12.82	13.93	15.08	15.66	15.67	15.48	15.53	15.58	15.25	14.38	13.25	12.47

Para ilustrar la aplicación de la fórmula de Penman modificada en el cálculo de ETP, se usarán los mismos datos del ejemplo anterior con la excepción de la humedad relativa, que tendrá aquí un valor de 71%.

a) Cálculo de (ea-ed): déficit de saturación,

$$ea = \text{con una temperatura media} = 20.5^{\circ}\text{C} = 24.15 \text{ mb} \\ (\text{Tabla 13A del anexo})$$

$$ed = ea \times H.R. = 24.15 \times .71 = 17.15 \text{ mb}$$

Luego:

$$\text{Déficit de saturación (ea-ed)} = 24.15 - 17.15 = 7.00 \text{ mb}$$

b) Cálculo de F(u)

$$F(u) = 0.27 \left(1 + \frac{U^2}{100} \right) \quad (\text{Tabla 12A anexo})$$

donde:

$$U^2 = 300 \text{ km/día a 2 metros de altura}$$

$$= 0.27 \left(1 + \frac{300}{100} \right)$$

$$F(u) = 1.08$$

c) Cálculo de (1-w) = 0.28 (Tabla 13A anexo)

d) Cálculo de Rn

$$Rn = Rns - Rnl$$

donde:

Rns = radiación neta de onda corta

Rnl = radiación neta de onda larga

$$Rns = (1 -) R_s$$

$$= 0.25$$

$$= (1 - 0.25) 8.10$$

$$= 6.08$$

$$Rnl = f(T) \times f(ed) \times f(n/N)$$

$$f(T) = 14.7, \text{ para } T \text{ media de } 20.5^{\circ}\text{C} \text{ (Tabla 15A anexo)}$$

$$f(ed) = 0.1555, \text{ para } ed = 17.15 \text{ mb} \text{ (Tabla 18A anexo)}$$

$$f(n/N) = 0.54, \text{ para } n/N = 0.49 \text{ (Tabla 17A anexo)}$$

$$Rnl = 1.24$$

$$R_n = 6.08 - 1.24$$

$$R_n = 4.84 \text{ mm/día}$$

e) Cálculo de W , $W = 0.72$, para temperatura media = 20.5°C
y altitud de 1550 msnm (Tabla
10A anexo)

f) Cálculo de $W \times R_n = 0.72 \times 4.84 = 3.48 \text{ mm/día}$

g) Cálculo del factor de ajuste c

$$\text{Para } U \text{ día} = 3 \text{ m/s}$$

$$U \text{ noche} = 3 \text{ m/s}$$

$$R_s = 8.10 \text{ mm/día}$$

$$\text{H.R. máx.} = 90\%$$

$$U = 0.98 \text{ (Tabla 18 A)}$$

Substituyendo todos los valores obtenidos en la
ecuación original:

$$\text{ETP} = c \times W \times R_n + (1-w) F(u) (ea-ed)$$

$$\text{ETP} = 0.98 \times 0.48 + (0.28) (1.08) (7.00)$$

$$\text{ETP} = 5.53 \text{ mm/día}$$

3. Evapotranspiración Real (ETr)

Para calcular la ETr de los cultivos se procede como
sigue:

$$\text{ETr} = \text{ETP} \times K_c$$

donde:

K_c = coeficiente de cultivo, el cual varía con la
etapa de desarrollo del cultivo.

La Figura 7.3. muestra en forma esquemática la manera
de estimar K_c , dependiendo de la etapa de desarrollo del
cultivo. En el Cuadro 7.7 se presentan valores aproximados
de K_c para varios cultivos.

La ETr o uso consuntivo para varios cultivos se
presenta en el Cuadro 7.8. La amplitud de los valores de ETr
es debido a las diferentes condiciones climáticas y
variedades estudiadas.

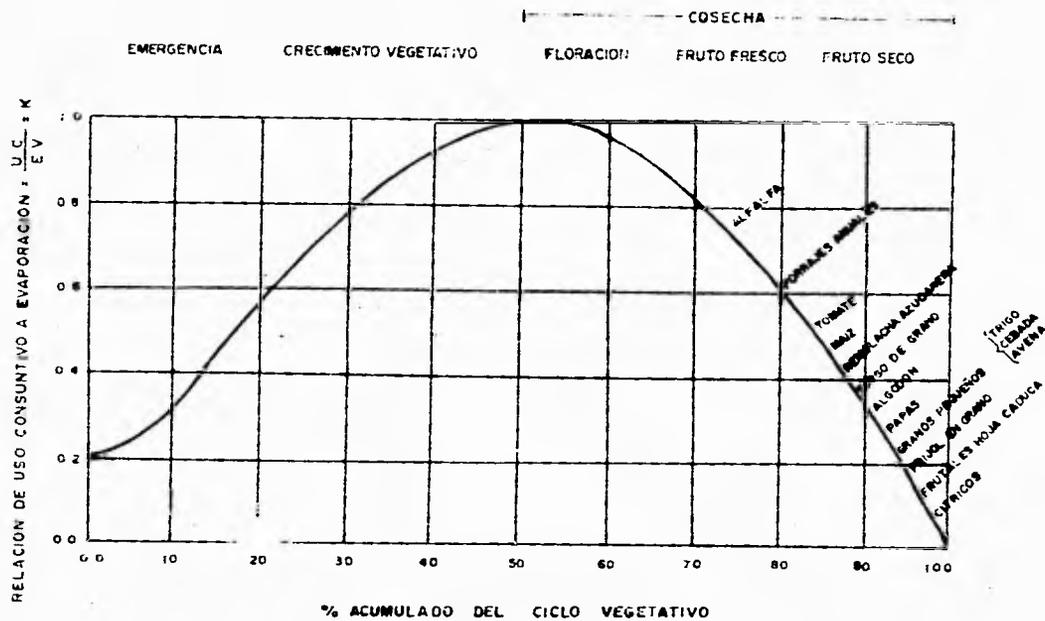


Figura 7.3 Curva única de Hansen, para el cálculo de los coeficientes de desarrollo. (Grassi, 1975).

Cuadro 7.7 Coeficientes de cultivo (Kc) para varios cultivos en diferentes etapas de desarrollo y condiciones climáticas prevalentes. (Doorenbos y Pruitt, 1977).

CULTIVO	HUMEDAD	HRmin. >70%		HRmin. <20%	
	VIENTO m/seg.	0-5	5-8	0-5	5-8
TODOS LOS CULTIVOS	ESTADO CULTIVO				
	INICIAL 1	USAR FIG.			
	VEGET. 2	INTERPOLANDO			
	REPRODUCTIVO 3	1.05	1.1	1.15	1.2
	MADUREZ 4	.25	.25	.2	.2
FRIJOL (SECO)	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	.3	.3	.25	.25
MAIZ (DULCE)	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	.95	1.0	1.05	1.1
MAIZ (GRANO)	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	.55	.55	.6	.6
ALGODON	3	1.05	1.15	1.2	1.25
	4	.65	.65	.65	.7
GRANOS	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	.3	.3	.25	.25
MELON	3	.95	.95	1.0	1.05
	4	.65	.65	.75	.75
HIJO	3	1.0	1.05	1.1	1.15
	4	.3	.3	.25	.25
AVENA	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	.25	.25	.2	.2
SORGO	3	1.0	1.05	1.1	1.15
	4	.5	.5	.55	.55
SOYA	3	1.0	1.05	1.1	1.15
	4	.45	.45	.45	.45
GIRASOL	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	.4	.4	.35	.35
TRIGO	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	4	.25	.25	.2	.2

Cuadro 7.8 Rango aproximado de Evapotranspiración Real de algunos cultivos en mm. (Doorenbos y Pruitt. 1977).

Cultivo	Evapotranspiración (mm)
Alfalfa	600 - 1500
Aguacate	650 - 1000
Plátano	700 - 1700
Frijol	250 - 500
Cacao	800 - 1200
Café	800 - 1200
Algodón	550 - 950
Linaza	450 - 900
Granos (pequeños)	300 - 450
Maíz	400 - 750
Oleaginosas	300 - 600
Cebolla	350 - 600
Naranja	600 - 950
Papa	350 - 625
Arroz	500 - 950
Sorgo	300 - 650
Soya	450 - 825
Caña de Azúcar	1000 - 1500
Camote	400 - 675
Tabaco	300 - 500
Tomate	300 - 600
Verduras	250 - 500
Viñedos	450 - 900

7.7 Cálculo del balance de humedad

A. Método Hidrológico para estimar el Balance de Humedad del suelo.

El balance de humedad en el suelo puede describirse con la siguiente ecuación:

$$P + I = \text{hum} + ET + \text{Perc.} + \text{Esc.}$$

donde:

- P = Precipitación.
- I = Irrigación.
- hum = Cambios de humedad en el suelo para un periodo dado.
- ET = Evapotranspiración.

Perc. = Percolación.
Esc. = Escurrimiento.

Si se conoce la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, es posible calcular su balance de humedad comparando precipitación más irrigación con la tasa de evapotranspiración. Los términos Percolación y Escurrimiento pueden medirse o estimarse.

El balance de humedad puede calcularse a nivel diario, semanal o mensual, dependiendo de los objetivos. Con fines operativos (manejo de agua de riego), su cálculo a nivel semanal puede ser satisfactorio en la mayoría de los casos; mientras que para fines de planeación, períodos de 10 a 30 días pueden ser adecuados.

En el cuadro 7.9 se presenta una forma con un ejemplo que muestra la manera de calcular el balance de humedad. Esta hoja de cómputo incluye seis componentes: precipitación, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, reserva de humedad del suelo, déficit y exceso de humedad. Cuando se aplique irrigación, este componente debe ser también agregado.

La ecuación que describe el balance de humedad puede ser empleada también para estimar la evapotranspiración si se despeja el término ET como sigue:

$$ET = P + I - \text{hum} - \text{Esc.} - \text{Perc.}$$

Para calcular ET es necesario medir o estimar los términos del lado derecho del signo igual. La precisión de los valores de ET dependerá principalmente del método empleado para determinar el contenido de humedad del suelo a profundidad radical. La figura 7.4 presenta en forma esquemática varios métodos para estimar el contenido de humedad del suelo (barreras y dispersor de neutrones) o bien la tensión de humedad (bloques de yeso).

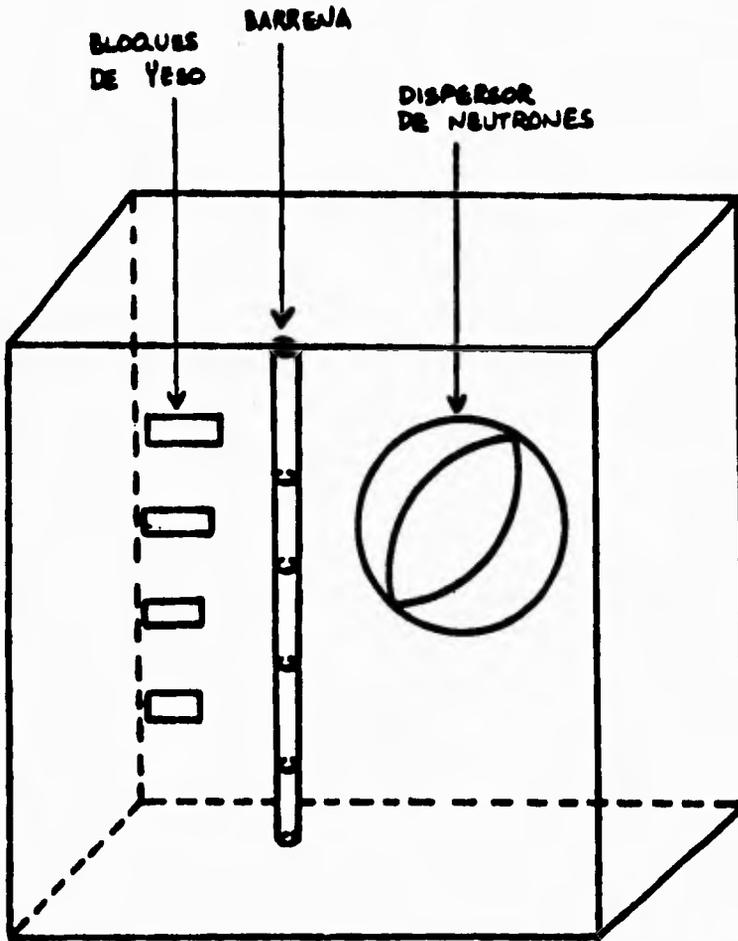


Figura 7.4 Representación esquemática de diferentes técnicas para medir la humedad del suelo. (Shaw, 1982).

Cuadro 7.9 Ejemplo del Cálculo del Balance de Humedad del suelo para la estación de crecimiento. (Villalpando, et al. 1984).

LOCALIDAD _____ AÑO _____ CAPAC. ALMAC. DEL SUELO 100 mm

MES	JUN	JULIO			A G O S T O			S E P T .			O C T .		
DECENA	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	TOTALES
Precipitación	20	59	12	61	56	50	20	0	5	37	16	0	336
Evapot. Potencial	43	36	33	27	46	42	41	45	33	31	29	28	434
Res. de Humedad	0	23	2	36	46	54	33	0	0	6	0	0	200
Evapot. Real	20	36	33	27	46	42	41	33	5	31	22	0	336
Déficit	23	0	0	0	0	0	0	12	28	0	7	28	98
Exceso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
* Decenas con Sequía	X		X					X	X	X	X	X	7

* Res. Hum \leq 20mm

ET Real + Déficit = ETP

Res. hum. + ET Real + Exceso = PRECIPITACION

Mediante el cálculo del balance de humedad ilustrado en el Cuadro 7.9 es posible calcular la probabilidad de periodos con sequía para diferentes capacidades de almacenamiento de agua en el suelo, como se ilustra en la Figura 7.5. Para construir una gráfica de este tipo es necesario calcular el balance de humedad para un número largo de años (20-30 años) incluyendo suelos de capacidad de almacenamiento de humedad variable.

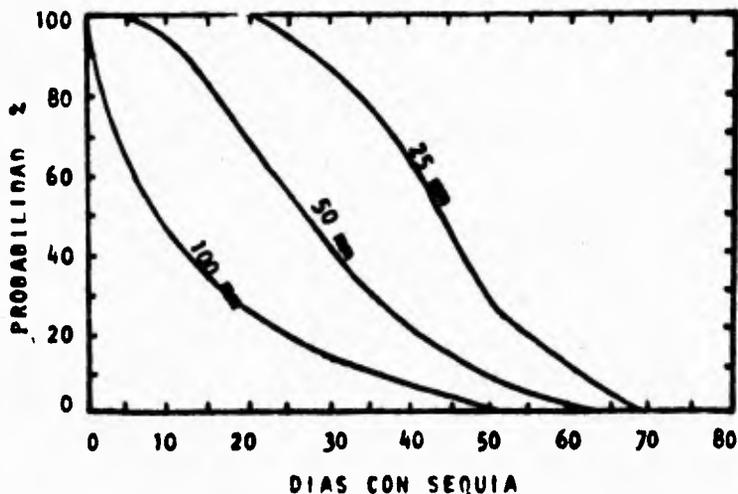


Figura 7.5 Probabilidades de tener días con sequía en una estación de crecimiento para varias capacidades retención de humedad. (Van Bavel, 1953).

Estimación del Balance de Humedad (Método de la FAO).

Este método se lleva a cabo mediante el cálculo de diferentes parámetros, los cuales se tabulan en una planilla de cálculo, la cual se muestra a continuación.

La simbología utilizada en la forma de cálculo así como la manera de obtener los valores para anotarlos en esta forma se describen a continuación:

PN (Precipitación promedio) Este símbolo expresa la precipitación promedio por decena calculada a partir de una serie climatológica de la estación que se está trabajando.

Pa (Precipitación Real) La precipitación real representa el total de la precipitación que ha caído en cada decena del año que se está utilizando.

da (Número de días con lluvia) La observación de días lluviosos en la decena, muestra la distribución de la lluvia durante este período.

ETP (Evapotranspiración Potencial) La evapotranspiración potencial tomada como referencia en este trabajo es la máxima cantidad de agua que sería evaporada por una cubierta densa de pasto corto cuando la disponibilidad de humedad del suelo es ilimitada. Este valor de ETP se encuentra con la evaporación del tanque evaporímetro multiplicada por un factor que va de 0.70 a 0.75.

Kcr (Coeficiente de cultivo) Durante el período vegetativo que abarca de la emergencia a la aparición de partes reproductivas, la evapotranspiración real del cultivo es una fracción de la evapotranspiración potencial, dicha fracción se puede estimar utilizando la Figura 7.3 y el Cuadro 7.7.

WR (requerimientos de agua del cultivo) Este valor es obtenido multiplicando la evapotranspiración potencial de cada decena por su respectivo coeficiente de cultivo (Kcr). También es posible calcular el requerimiento total de agua del cultivo para una estación, sumando los requerimientos de agua de cada decena.

Pa - Wr (Diferencia entre la precipitación real y el requerimiento de agua del cultivo). La diferencia aquí obtenida nos expresa la cantidad de agua disponible al cultivo, sin tomar en cuenta el agua almacenada en el suelo.

RS (Reserva de agua en el suelo) Este término expresa el agua almacenada en el suelo la cual fácilmente es usada por el cultivo. En otras palabras, es la reserva de agua entre la capacidad de campo y el por ciento de marchitez permanente.

La cantidad de agua almacenada para su utilización en el suelo dependerá de:

- 1) La profundidad del suelo explorada por las raíces del cultivo, y
- 2) Las características físico-químicas del suelo.

S/D (Excesos y Déficit de agua). El exceso se refiere a cualquier cantidad de agua arriba de la capacidad de campo del suelo y el déficit, a cualquier requerimiento de agua abajo de cero en el valor de agua almacenada, el cual se marca negativamente.

I (Índice). Este índice indica en que porcentaje se satisfacen los requerimientos de agua de un cultivo en cualquier etapa o estado de desarrollo. Su cálculo es de la siguiente manera:

- a) 100% si no hay déficit o si el exceso <100 mm.
- b) Si el exceso >100 mm. entonces restar 3% de 100.
- c) Si existe déficit, entonces se divide éste entre el total de requerimientos de humedad y se multiplica X 100 y el resultado se resta de 100.

ejemplo:

El Cuadro 7.6 muestra el cálculo del balance de humedad para frijol en Pabellón, Ags. por el método de la FAO. Para calcular el valor de I, supongamos que se tiene un déficit = 16.

$$I = 100 - \left(\frac{D}{WR} \times 100 \right)$$

$$I = 100 - \left(\frac{16}{272} \times 100 \right)$$

$$I = 94$$

Si se registra un nuevo déficit, calcular I, pero ahora se resta de 94 en lugar de 100. De la misma forma se haría para nuevo déficit.

Cuadro 7.10 Estimación de Balance de Humedad e Índice de Sequía (I) para frijol en Pabellón, Aguascalientes. Método de la F.A.O. (Villalpando, et al. 1984).

M E S	JULIO		AGOSTO			SEPTIEMBRE			OCTUBRE			
DECENA	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	
PN	42.5	33.1	27.8	37.2	22.4	21.1	29.5	29.8	12.6	6.9	8.9	
PA	24	22	20	24	16	10	16	12	6	4	8	
DA	6	2	2	3	1	1	0	0	3	3	0	
ETP	40	45	41	31	38	34	33	31	32	29	32	
Kcr	.4	.4	.7	.7	1.0	1.0	1.0	.8	.8	.6	.5	
MR	16	18	28	22	38	34	33	25	25	17	16	272
PA-MR	8	4	-8	2	-16	-24	-17	-13	-19	-13	-8	
RS	8	12	4	6	0	0	0	0	0	0	0	
S/D	0	0	0	0	-16	-24	-17	-13	-19	-13	-8	
I	100%	100%	100%	100%	94%	85%	79%	74%	67%	62%	59%	

* Prob. de Lluvia al 50%

ETP = Evap. x .75

Capacidad de Almacenamiento 80 mm a 60 cm. de Profundidad.

CAPITULO 8

RIESGOS METEOROLOGICOS PARA LA VEGETACION

8.1 Introducción

La probabilidad de ocurrencia de fenómenos meteorológicos diversos como son: granizo, heladas, vientos fuertes, rocío y niebla, es de suma importancia para una buena caracterización del clima, ya que aún cuando existan condiciones de temperatura, humedad y radiación solar adecuados para el desarrollo de un cultivo, éste puede verse afectado de diversas formas por algunos de los fenómenos ya mencionados.

Por ésta razón, el conocimiento de las probabilidades de ocurrencia de estos fenómenos en la agricultura y particularmente en una región, darán información valiosa para mejorar el enfoque de los objetivos de investigación y consecuentemente una mejor regionalización de los cultivos.

En la mayor parte del territorio nacional, la ocurrencia de estos fenómenos está latente y su evaluación ha sido sólo en cuanto a su presencia o ausencia, por lo que el enfoque de evaluación en base a probabilidades en cada área de influencia de los campos agrícolas experimentales sería de gran utilidad para una mejor planeación de la agricultura regional.

8.2 Efectos de los fenómenos meteorológicos en la vegetación

Robertson (1980) hace mención de la existencia de ciertos fenómenos meteorológicos como: granizo, heladas, vientos fuertes, etc., que pueden aparecer durante la estación de crecimiento de los cultivos y la importancia de determinar la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos.

Granizo.

Barry y Charley (1975), definen el granizo como un tipo de precipitación formado por acumulaciones más o menos concéntricas de hielo transparente y opaco y cuya contribución a los totales de precipitación es mínima.

Asimismo, Arroyo, et al, (1967), definen al granizo como toda precipitación que llega al suelo en forma sólida y amorfa y que mide de dos a cinco milímetros de diámetro. Son difíciles de romper o aplastar, y cuando caen al suelo rebotan sin romperse además, tienen la facultad de unirse entre sí, dando lugar a formaciones de hasta 50 milímetros de diámetro o más.

En cuanto al daño que el granizo ocasiona a las plantas Kramer et al (1983), señalan que el granizo daña a las flores, los frutos, las hojas y los tejidos corticales y que la granizada no sólo puede destruir la cosecha, sino también dañar gravemente a los cultivos.

Por otro lado, Arroyo, et al, (1967), apuntan que los daños ocasionados en la vegetación dependen del tamaño de los gránulos, de la duración de la granizada, y de la violencia de la caída, y añaden que la distribución de la granizada no es de manera uniforme pues el daño se reparte por fajas o zonas y por ésta razón, al granizo en España se le ha dado el sobrenombre de "lotería del infierno" ya que las zonas afectadas sufren de irreparables daños mientras que otras colindantes quedan indemnes.

Los mismos autores enfatizan que si el granizo cae al comienzo del periodo de crecimiento de plantas herbáceas, éstas pueden seguir su desarrollo rebrotando e incluso dar una regular cosecha; pero si la granizada cae en la etapa reproductiva del cultivo, la pérdida puede llegar a ser completa.

En cuanto a los medios de lucha contra este fenómeno meteorológico, De Pina y Ravelo (1973), refieren que, numerosos científicos de todo el mundo, han concentrado sus esfuerzos para anular o al menos reducir los cuantiosos daños que causa el granizo anualmente en las áreas agrícolas. Ellos mismos señalan que en todos los casos en los cuales las experiencias fueron conducidas en forma seria, los resultados fueron dudosos, cuando no negativos. Algunos de los métodos de lucha empleados fueron: siembra de nubes cumulus con núcleos gigantes de sal para producir mayor número de piedras que reemplacen a las más grandes, pero los resultados obtenidos fueron negativos. Otro método empleado fue la siembra de cristales de yoduro de plata en las nubes para reducir el contacto entre gotas de agua que aumentan el tamaño del granizo, ya que el yoduro convierte las gotas sub-enfriadas en cristales de hielo, pero los resultados que se han obtenido, no han llegado a ninguna conclusión favorable.

En resumen, señalan que en la actualidad no se conoce un sistema seguro y económico para evitar la formación de granizo.

Arroyo, et al, (1967) mencionan que lo único práctico hasta el presente, que cada vez se extiende más y más, es el asegurar las cosechas para prevenir el riesgo del granizo. La cuota del seguro tiene que ser proporcional a la mayor o menor sensibilidad de la planta, a los efectos del granizo y a la mayor o menor probabilidad de que dicho fenómeno se presente en la región.

Heladas.

Otro de los factores climáticos que afectan fuertemente a la agricultura son las heladas, Arroyo et al (1967) comentan a cerca de este fenómeno que es uno de los "accidentes" que más asustan el ánimo del campesino y que todo aquello que se haga por divulgar en que consiste este fenómeno, sus causas y circunstancias que lo rodean será beneficioso.

Las heladas se pueden clasificar según su época de ocurrencia, por el proceso físico que les da origen y por los efectos visuales que causan sobre la vegetación. Una clasificación general, de acuerdo a los tres criterios anteriores es la siguiente:

1. Época de ocurrencia:
 - a. primaverales (tardías)
 - b. invernales
 - c. otoñales (temprana)
2. Proceso físico:
 - a. advección (masas de aire frío)
 - b. radiación (inversión)
 - c. mixtas
 - d. evaporación
3. Efectos visuales:
 - a. blancas (escarcha)
 - b. negras (necrosis)

Se considera como **helada** a un descenso de la temperatura del aire, menor o igual a 0°C, determinada mediante un termómetro ubicado en una caseta reglamentaria a una altura de 1.5 m.

De Fina y Ravelo (1975) mencionan que en los estudios de meteorología o climatología agrícola se considera que hubo helada toda vez que el termómetro de mínima, colocado en la garita reglamentaria, a 1.50 m. sobre el suelo, acusa una temperatura del aire igual o inferior a 0°C.

Por otro lado, Arroyo, et al, (1967) señalan que no hay unanimidad de criterios en cuanto al concepto de helada

desde el punto de vista agrícola, ya que hay plantas de hojas persistentes que resisten temperaturas muy bajas; otras en cambio, sucumben en pocos minutos en cuanto termómetro desciende unas décimas por debajo de cero. Incluso no es preciso que la temperatura sea bajo cero para que ciertas plantas se vean afectadas de alguna forma.

Bagdonas, et al, (1978), apuntan que el daño o destrucción de los cultivos por heladas o bajas temperaturas se han venido incrementando significativamente y que las pérdidas por éste fenómeno podrían ser prevenidas por prácticas de protección del frío activas o pasivas.

De Fina y Ravelo (1973) mencionan que los órganos de las plantas, o los individuos completos, mueren cuando son sometidos a la acción de un frío suficientemente intenso y prolongado.

Refiriéndose a esto, Torres (1983) explica el daño por heladas en plantas de la siguiente manera: "Entre las células del vegetal existe agua casi pura, pero dentro de las células, en el protoplasma, el agua posee solutos por lo que se congela a temperaturas inferiores a 0°C. Cuando la temperatura baja a 0°C se forman cristales de hielo de agua existente entre las células. El protoplasma de las células expuestas a temperaturas heladas está sujeto a varios tipos de daños, entre los que están la gradual deshidratación del protoplasma, reduciendo el volumen de la célula y aumentando la concentración de sales en el líquido que permanece en la célula, para evitar la congelación de los líquidos protoplásmicos; sin embargo, la célula puede no enfermarse y volver a su condición y forma originales, pero al derretirse el hielo ocasionando la difusión del agua, el protoplasma se rehidrata rápidamente y se puede ocasionar la ruptura del ectoplasma y de la membrana celular, o por otra parte, la concentración de sales en el protoplasma pudo llegar a ser tan alta que tuviera efectos tóxicos.

La planta es dañada también cuando atraviesa un período más o menos largo con una temperatura de unos 4°C, pues disminuye grandemente su absorción de agua de suelo y sigue transpirando, por lo que puede llegar a morir por deshidratación si el período bajó esta temperatura es largo".

Por otro lado, Rosenberg (1974) apunta, que la longitud de la estación de crecimiento para un cultivo específico es fijada esencialmente por la ocurrencia de heladas es suficientemente baja temperatura para dañar los cultivos en primavera u otoño. El mismo autor cita a Thom y Shaw (1958) quienes señalan que las series de fechas de heladas han mostrado estar aleatoria y normalmente distribuidas por lo que la media y la desviación estandard son estadísticas válidas, con éstos parámetros puede ser calculada la

probabilidad de que la última y la primera helada caigan antes o después de una fecha dada.

Arroyo, et al, (1967) también señalan que conocida la frecuencia o intensidad de las heladas de una región, pueden escogerse especies apropiadas para su cultivo (ciclo corto, maduración tardía o temprana, etc.).

Como ejemplo de trabajos de éste tipo, podemos citar los de **Rosenberg y Meyer (1962)**, sobre la naturaleza de la estación de crecimiento por heladas en Platte Valley, Nebraska; **Schaal et al (1961)**, acerca del riesgo de temperaturas bajas en primavera y otoño en Indiana, E.U.A.; **Thom y Shaw (1958)**, quiénes hacen un análisis climatológico de los datos de heladas para Iowa, E.U.A. etc.

Vientos Fuertes.

Arroyo, et al, (1967) explican la importancia del viento como factor muy importante para el agricultor ya que es el responsable directo e indirecto de las características climatológicas de una región. También añaden que a este elemento van vinculados muchos fenómenos meteorológicos favorables o adversos para la agricultura.

Chang (1968) menciona que el viento afecta el crecimiento de las plantas en por lo menos 3 formas significativas: transpiración, entrada de CO₂ y daños mecánicos a hojas y ramas. el mismo autor, apunta que en los experimentos controlados se han observado que la transpiración se incrementa con la velocidad del viento hasta un cierto punto y decrece ligeramente a grandes velocidades del viento.

La relación exacta entre viento y transpiración, varía grandemente entre especies. **Seybold**, citado por **Chang (1968)** encontró que el viento ejerce una mayor influencia sobre las plantas con transpiración cuticular mientras que en las plantas con transpiración estomatal esta influencia es menor.

El mismo **Chang (1968)** añade que el efecto del viento sobre transpiración variará con la temperatura y humedad del aire sobre la superficie de la planta, además señala que en climas áridos, los vientos secos y calientes causan rápido marchitamiento de las plantas.

Chang (1968) cita a **Deneke** quien concluyó que la entrada de CO₂ a la planta se incrementa linealmente hasta una velocidad de viento de 1.67 m/seg. arriba del cual ningún incremento fue observado.

En cuanto al daño mecánico a hojas y ramas, **Chang (1968)** expresa que las grandes velocidades del viento son

dañinas al crecimiento de las plantas y añade que las hojas dañadas mecánicamente por el viento tienen una reducida capacidad para la fotosíntesis y la translocación.

Por otro lado, Arroyo, et al, (1967) mencionan los siguientes efectos dañinos del viento fuerte: acame de cereales; deformación de la copa de los árboles; bruscas variaciones térmicas; caída de flores; trozado de ramas; erosión eólica y transporte de arenas a tierras de cultivo. También, apuntan que el viento es el acompañante inmediato y, a veces, el responsable directo de muchos meteoros adversos a la agricultura como: heladas, nubes tormentosas (portadoras de granizo), etc.

Por lo tanto, el conocimiento de las probabilidades de ocurrencia de vientos fuertes, ayudaría a una mejor ubicación de los cultivos, así como la planeación de métodos de protección contra éste fenómeno de una manera más eficiente.

Rocío.

De Fina y Ravelo (1973) apuntan que, en las mañanas posteriores a las noches de viento muy leve y despejadas, es frecuente observar sobre el pasto, vegetación bajo y ciertos objetos, un depósito de gotitas de agua; es el fenómeno llamado rocío.

El rocío se forma cada vez que la delgada capa de aire que rodea a la hoja, flor, etc., se enfría lo suficiente, como para permitir que la temperatura de dicha envoltura aérea llegue a ser inferior a su correspondiente punto de rocío. Las gotitas de rocío proceden exclusivamente de la condensación del vapor de agua contenido en la capa de aire que rodea las hojas, flores, etc. Dicha capa sufre un pronunciado enfriamiento al hallarse en contacto con la superficie de los vegetales, que por efecto de una fuerte termoradiación pierden una gran cantidad de calor.

Como conclusión, mencionan que el rocío no cae como el agua de lluvia sino que se forma sobre los objetos, plantas, etc., es decir, es una forma de condensación del vapor de agua.

El efecto del rocío sobre la vegetación es señalado por De Fina y Ravelo (1973) principalmente de dos formas: a) Como proveedor de agua, ya que algunos vegetales inferiores y superiores han demostrado poseer la capacidad de aprovechar el agua de rocío para cubrir sus necesidades hídricas; b) Favorecer el desarrollo inicial de patógenos como bacterias, hongos, etc. que provocan enfermedades en las plantas.

También aclarar que la cosecha de muchos cultivos se efectúa en forma deficiente cuando las plantas se hallan cubiertas de rocío; por tal causa no es posible iniciar la tarea hasta que el sol lo haya disipado, lo cual origina pérdida de tiempo en un momento de tanta importancia.

Los mismos autores, añaden que a la inversa de lo que se supone, el rocío es perjudicial a la agricultura y que existen algunas excepciones del perjuicio que ocasiona dicho fenómeno como, el espolvoreo de productos químicos que se adhieren mejor a la planta cuando ésta se halla recubierta por una leve capa de rocío y el agua que pueden absorber algunas plantas debido a éste fenómeno.

Arnon (1975) opina que las aportaciones hídricas a la planta en lugares donde el agua es un factor limitante son mínimas ya que el déficit de agua en las plantas, ocurren durante las horas más calientes, mucho tiempo después de que el rocío ya se ha evaporado.

Dado lo anterior, el cálculo de probabilidades de ocurrencia de éste fenómeno, será de utilidad en cuanto a su relación con la aparición de ciertas enfermedades en las plantas superiores, principalmente.

Nieblas.

Arroyo, et al, (1967) señalan que la niebla es un fenómeno de condensación que se forma cuando la temperatura del ambiente está próxima al punto de rocío, estando el aire húmedo.

En cuanto al efecto que la niebla tiene en los cultivos Kramer, et al, (1982) mencionan que la niebla daña la vegetación joven y las flores cuando se produce un fuerte enfriamiento de la atmósfera; pero quizá contrarreste la presencia de las heladas tardías al evitar que el ambiente se enfríe por la noche. Las nieblas persistentes no convienen a la floración y activan la micosis si se presentan en el período vegetativo. Añaden que, la niebla otoñal y el tiempo cálido actúan favorablemente en la coloración del fruto; pero retardan el término del crecimiento de los brotes y, por ende, aumentan el peligro de que se hielan cuando aquella es muy densa y persistente.

Chang (1968) apunta la importancia de las aportaciones hídricas por la niebla y ejemplifica esto con las precipitaciones por niebla en algunas localidades de Africa del Sur y Hawaii., las cuales han llegado a superar las precipitaciones totales por lluvia.

Por último, cabe mencionar los comentarios de De Fina y Ravelo (1973) quienes señalan que si bien las predicciones meteorológicas actualmente, ayudan muy poco a luchar contra

las adversidades atmosféricas que dañan a la agricultura extensiva, el cálculo de probabilidades de que ocurra en un lugar, eventos desfavorables para un cultivo, ofrece soluciones más firmes, para ser difundidas a investigaciones agrícolas y añaden que la agricultura de un lugar será tanto más racional cuanto más se acomode a la marcha frecuente de los eventos atmosféricos que caracterizan a la localidad.

8.3 Cálculo de probabilidades de fenómenos meteorológicos diversos

Cálculo de Probabilidades de Granizo.

Thom (1966), reporta que las modalidades de distribución de frecuencias más usadas en el cálculo de probabilidades de eventos raros como el granizo, son la distribución binomial y la distribución Poisson.

A continuación se ejemplificara usando la distribución de Poisson.

La función de probabilidad Poisson está dada por la siguiente fórmula:

$$P(X) = mN \frac{e^{-m}}{N!}$$

Para calcular la probabilidad de observar un valor de tamaño N.

$$P(X < N) = \sum_{i=1}^N mN \frac{e^{-m}}{N!}$$

Para calcular la probabilidad de observar un valor X, donde $0 < X < N$

$$P(X > N) = 1 - P(X < N)$$

Para calcular la probabilidad de observar un valor de X mayor que N.

Para calcular probabilidades con la distribución Poisson el único parámetro a determinar es la media (m), la cual es determinada como sigue:

$$m = X / n$$

ejemplo: Para ilustrar la aplicación de esta distribución, (Villalpando, 1984) se emplearán los datos de días con granizo registrados en la estación climatológica de Cuquío,

Jal., para el mes de agosto, para el periodo de 1950 a 1980. La media de granizadas determinada fue de $m = 0.6129$.

Para saber cual es la probabilidad de que ocurran 0, 1, 2, ó más granizadas durante el mes de agosto.

Aplicando la fórmula de distribución acumulativa de probabilidad se tiene:

$$P(X) = mN \frac{e^{-m}}{N!}, \quad P(X) = \sum_{i=1}^N mN \frac{e^{-m}}{N!}$$

$$P(X=0) = 0.61290 \frac{(e^{-0.6129})}{0!} = 0.54$$

$$P(X=1) = 0.61291 \frac{(e^{-0.6129})}{1!} = 0.33$$

$$P(X=2) = 0.61292 \frac{(e^{-0.6129})}{2!} = 0.10$$

$$P(X>2) = 0.61293 \frac{(e^{-0.6129})}{3!} = 0.02$$

La probabilidad de ocurrencia de granizo usando la distribución Poisson, también puede ser calculada empleando la tabla de esta función. (Tabla 8A del anexo).

Para entrar a esta tabla usando los mismos datos del ejemplo anterior, se procede como sigue:

$m = 0.6129$	<u>Lectura Tabla</u>	<u>Probabilidad</u>
$P(X=0) =$	0.5421	0.5421
$P(X=1) =$	0.8737	0.3316
$P(X=2) =$	0.9755	0.1018
$P(X>2) =$	0.9963	0.0208

Para interpretar los valores obtenidos de tablas en casos como el presente, el valor acumulado que dan las tablas hay que respetar el valor inmediato anterior para obtener el valor de la probabilidad para el caso deseado.

(ejemplo $P(X=1) = 0.8737 - 0.5421 = 0.3316$).

Cálculo de Probabilidades de Heladas.

En regiones templadas o templado-frías, es importante conocer la estación de crecimiento, o sea el período en el cual puede desarrollarse un cultivo de siembra a cosecha. En éstas regiones la estación de crecimiento comúnmente está determinada de la ocurrencia de la última helada (primavera) a la primera helada (otoño). (Figura 8.1).

Para el cálculo de probabilidades de ocurrencia de primera y última helada se puede utilizar tanto métodos gráficos (distribución acumulativa) como distribuciones continuas (normal, log-normal, etc.).

Período Libre de Heladas.

Day (1911) citado por Grassi (1983), utiliza el término "Estación de Crecimiento", para definir el número de días entre la última helada que mata a las plantas en primavera y la primera helada que mata a las plantas en otoño. Mientras que Reed (1911), también citado por Grassi (1983), considera a la componente de probabilidad de ocurrencias de la última y primera helada, definiendo a la "Probable estación de Crecimiento" como el período comprendido entre la fecha con razonable seguridad en primavera y la fecha con razonable seguridad en otoño con condiciones óptimas de temperatura para el desarrollo de algunas plantas.

Grassi (1983), define al Período de Libre de Heladas (PLH), como el número de días comprendidos entre la fecha después de la cual es esperada una última helada con una probabilidad máxima aceptada para un cultivo y la fecha antes de la cual es esperada una primera helada con una probabilidad máxima aceptada para el mismo cultivo.

En este punto resaltan dos aspectos importantes, que el PLH puede establecerse con base en datos medios de ocurrencia de las últimas y primeras heladas, o con valores probabilísticos para éstos mismos eventos, como se ilustra en la Figura 8.2.

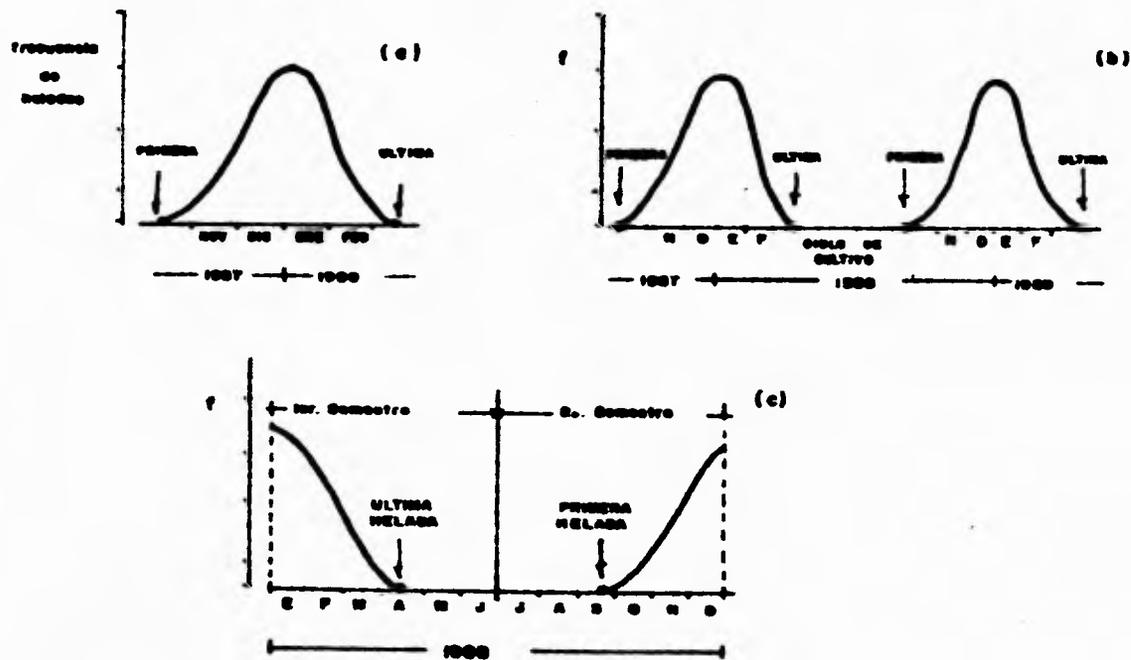


Figura 8.1 Definiciones gráficas de la primera y la última helada. (Pájaro y Ortiz, 1988).



Figura 8.2. Período Libre de Heladas.
(Pájaro H., D. y Ortíz S., C.A., 1988).

Método Gráfico.

Cuando se dispone de información para establecer las probabilidades de ocurrencia de las heladas (generalmente datos de estaciones con 20 años de observación, como mínimo) es posible definir los riesgos máximos a los que se expone un cultivo.

El riesgo máximo por heladas no debe ser el mismo para las últimas heladas, que normalmente pueden sorprender al cultivo en su fase vegetativa, que para las primeras, que pueden sorprender al cultivo en su fase de llenado de grano.

El riesgo máximo a las últimas heladas al que puede exponerse un cultivo depende de la importancia económica del mismo, de su resistencia a las heladas, del período de tiempo necesario para completar su ciclo vegetativo y de las alternativas para establecer otras especies en caso de daño total.

Para el maíz, frijol, trigo, avena y cebada, Grassi (1983), propuso como un nivel razonable de riesgo el 20%, es decir, sembrar en la fecha después de la cual se espera una última helada con una probabilidad no mayor a perder el cultivo en un año de cada cinco.

Las primeras heladas, que también afectan a los cultivos ya mencionados, en su fase de llenado de grano pueden ocasionar daños irreversibles; ya que el productor no tiene ninguna otra alternativa de siembra y puede lesionar sus intereses. Por tal motivo, el riesgo al cual puede ser expuesto el cultivo deberá ser menor que en el caso de las últimas heladas. En general para el maíz, frijol, cebada,

avena y trigo, se considera que dicho riesgo no debe ser mayor al 10%, es decir, aceptar el hecho de que en un año de cada diez de cultivo se verá afectado por primeras heladas en su fase de llenado de grano.

Procedimiento de Estimación.

Cuando se dispone de información de fechas de ocurrencia de las últimas y primeras heladas es posible elaborar gráficas para conocer los niveles de probabilidad de las fechas en que se presentarán (ver Figura 8.3.). Sin embargo, esto no es posible en la mayoría de las estaciones del país por la falta de datos.

Generación de los Datos Básicos.

La información sobre las heladas se reporta en las Normales Climatológicas (1976) como el número de días con heladas en el mes. Por ejemplo la estación Atenco, México, presenta los siguientes datos.

	E	F	M	A
Número de días con heladas	20.61	14.11	6.00	0.94
(Promedio de 19 años de observación)	M	J	J	A
	0.63	0.00	0.00	0.05
	S	O	N	D
	0.26	4.57	12.42	17.63

Suponemos que ésta es la única información de que disponemos y estamos interesados en establecer el Período Libre de Heladas de acuerdo con los conceptos discutidos anteriormente. De tal forma que si graficamos tales datos, obtenemos una distribución como en la Figura 8.4.

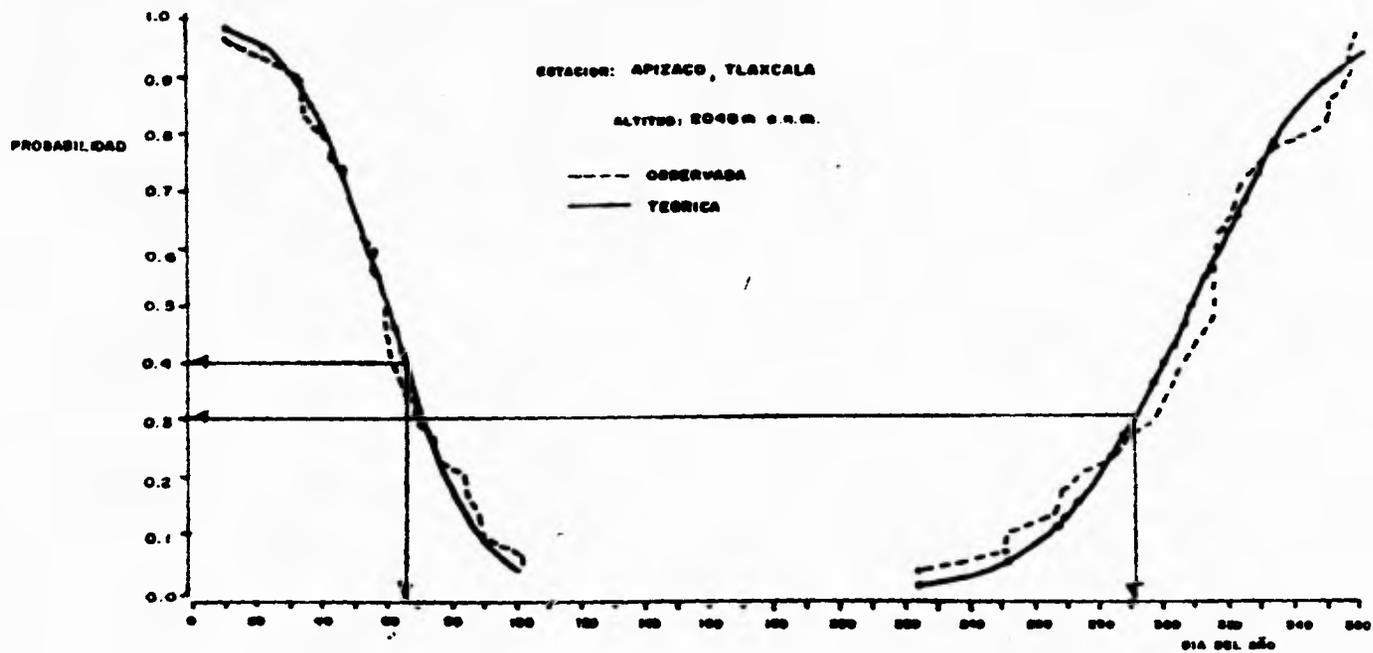


Figura 8.3 Probabilidades de heladas o grados centígrados.
 (Grassi, 1983).

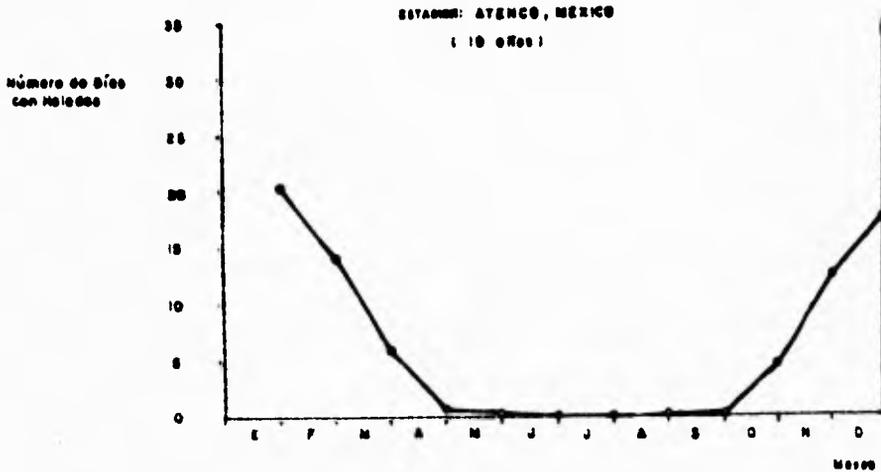


Figura 8.4. Distribución del Número de Días con Heladas a través del año. (Pájaro H.,D. y Ortiz S., C.A. 1988).

A partir de la información de cada estación y una gráfica como la del ejemplo, podemos conocer las fechas promedio en que se presentará una helada, considerando que entre dos puntos conocidos puede trazarse una línea recta, y si tales puntos se grafican en un sistema de ejes de coordenados el procedimiento resulta muy sencillo (Ortiz, 1988.(Figura 8.5).

Distribución acumulativa

Las probabilidades de primera y última helada, así como el período libre de heladas se puede calcular haciendo uso de la distribución acumulativa.

Para ilustrar la aplicación de la distribución acumulativa se utilizarán los datos de primera y última helada para los años en que éstas se presentaron en la estación climatológica de Cuquió, Jalisco. Para la serie histórica d 1949 a 1980. (cuadro 8.1)

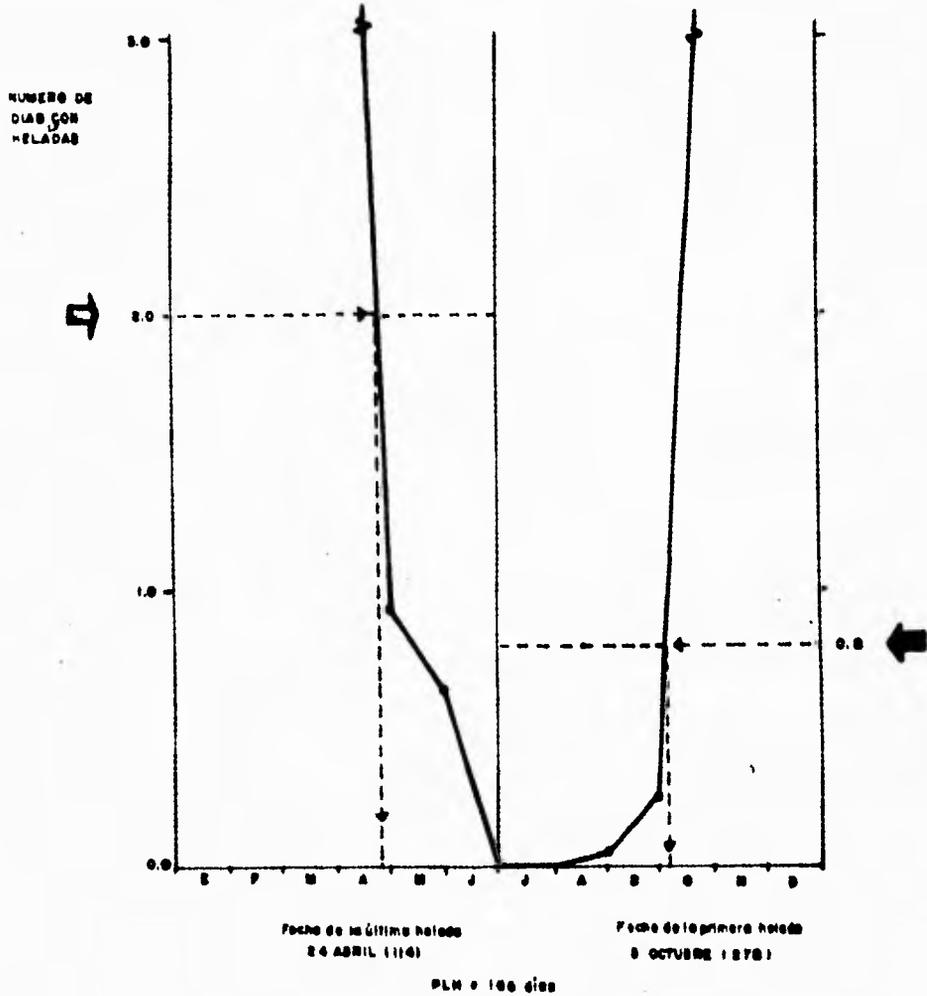


Figura 8.5 Información básica para generar las fechas de la primera y última helada.

Para calcular probabilidades con esta distribución primero se necesita calcular la frecuencia acumulada (F_a), ésta se obtiene como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Para última helada:} \quad F_a &= 1 - \frac{K}{m+1 \dots} \\ \text{Para primera helada:} \quad F_a &= \frac{K}{m+1} \end{aligned}$$

Donde:

K = Número de orden.
 m = Número de años de heladas.

Ejemplo:

Para Octubre 1º, el valor de F_a sería:

$$F_a = \frac{K}{M+1} = \frac{1}{17+1} = 0.0556$$

Para Octubre 11 el valor de F_a sería:

$$F_a = 1 - \frac{K}{m+1} = 1 - \frac{3}{22+1} = 0.8686$$

Los valores de F_a así obtenidos, tanto para primera como última heladas se grafican (Figura 8.6) y a partir de éstas se pueden calcular probabilidades.

La ocurrencia de primera y última helada al 80% de probabilidad se presentarían el 15 de Noviembre y el 17 de Marzo. En otras palabras, 8 de cada 10 años no se presentarían heladas antes del 5 de Noviembre y tampoco después del 17 de Marzo. Luego la estación libre al 80% de probabilidad sería de 232 días.

Distribución Normal.

Si existe un número grande de observaciones (muchos años con registros de temperatura para cuantificar la fecha de primera y última helada) y además, todos los años registran heladas, se sugieren usar la distribución normal para calcular probabilidades de primera y última helada.

Para calcular probabilidades mediante la distribución normal, es necesario primero conocer la desviación estándar y la media de los datos. La desviación estándar es obtenida como sigue:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad \text{ó} \quad s = \sqrt{\frac{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}{n - 1}}$$

Donde:

X_i = Cada una de las observaciones de heladas.
 \bar{X} = Media = $\sum X_i / n$
 n = Número total de observaciones.

Después de obtener los valores de s y \bar{X} se estandariza cada uno de los datos, tanto de primera como de última helada con la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{s}$$

Con los valores de Z así calculados para cada dato, se entra a la tabla de Z (Tabla 9A del anexo) y se encuentra la probabilidad de primera y última helada para las fechas de interés seleccionadas.

Ejemplo:

Para ilustrar el uso de la distribución normal en el cálculo de probabilidades de primera y última heladas se utilizarán los mismos datos de la estación climatológica de Cuquío, Jal., presentados anteriormente en el Cuadro 8.1. En este caso, la distribución normal se usará como una función matemática para ajustar la distribución de puntos, correspondientes tanto a la primera, como a la última helada. El cuadro 8.2 muestra la fecha, fecha codificada, el valor de z y la probabilidad de ocurrencia de una primera helada antes de la indicada $P (Z < Z_0)$. Y la probabilidad de ocurrencia de una última helada después de la fecha indicada $P (Z < Z_0)$.

La figura 8.6 muestra las curvas ajustadas a los datos observados de primera y última heladas. Con éstas curvas se pueden calcular probabilidades. Por ejemplo, la ocurrencia de primera helada al 90% de probabilidad se presentará el 24 de oct. En otras palabras, 9 de cada 10 años no se presentarán heladas antes del 24 de octubre.

Cuadro 8.1. Distribución Acumulativa para el Cálculo de Probabilidad de ocurrencia de Primera y Última Helada de los Datos Climáticos de la Estación de Cuquío, Jal.(Villalpando, et al. 1984).

PRIMERA HELADA			ULTIMA HELADA		
FECHA	K	F _a	FECHA	K	F _a
OCT. 01	1	0.0556	ENE. 2	1	0.9565
OCT. 12	2	0.1111	ENE. 7	2	0.9130
NOV. 01	3	0.1667	ENE. 11	3	0.8696
NOV. 08	4	0.2222	ENE. 14	4	0.8261
NOV. 09	5	0.2778	ENE. 16	5	0.7826
NOV. 09	6	0.3333	ENE. 21	6	0.7391
NOV. 18	7	0.3889	ENE. 23	7	0.6957
NOV. 20	8	0.4444	ENE. 30	8	0.6522
NOV. 23	9	0.5000	ENE. 31	9	0.6087
NOV. 29	10	0.5556	ENE. 31	10	0.5652
DIC. 04	11	0.6111	FEB. 8	11	0.5217
DIC. 05	12	0.6667	FEB. 13	12	0.4783
DIC. 07	13	0.7222	FEB. 16	13	0.4348
DIC. 15	14	0.7778	FEB. 17	14	0.3913
DIC. 17	15	0.8333	FEB. 24	15	0.3478
DIC. 23	16	0.8889	FEB. 24	16	0.3043
DIC. 24	17	0.9444	MAR. 13	17	0.2609
			MAR. 18	18	0.2174
			MAR. 19	19	0.1739
			MAR. 23	20	0.1304
			MAR. 26	21	0.0870
			MAR. 29	22	0.0435

$$F_a = \frac{K}{m+1} \quad (\text{para 1ra. helada})$$

$$F_a = 1 - \frac{K}{m+1} \quad (\text{para Última helada})$$

donde:

F_a = Frecuencia acumulativa

K = N.º de orden

m = Número de años con heladas

Cuadro 8.2. Probabilidades de primera y última heladas de acuerdo a una Distribución Normal ajustada a la Serie Histórica de datos de Temperatura (0°C) de la Estación Climatológica de Cuquío, Jalisco. (Villalpando, et al. 1984).

PRIMERA HELADA				ULTIMA HELADA			
FECHA	FECHA CO DIFICADA	VALOR DE Z	PROB. P(Z<Z ₀)	FECHA	FECHA CO DIFICADA	VALOR DE Z	PROB. P(Z>Z ₀)
OCT. 01	1	-2.18	0.014	ENE 2	2	-1.51	0.934
OCT. 12	12	-1.72	0.042	ENE 7	7	-1.33	0.908
NOV. 01	32	-0.88	0.189	ENE 11	11	-1.18	0.881
NOV. 08	39	-0.58	0.281	ENE 14	14	-1.07	0.857
NOV. 09	40	-0.54	0.294	ENE 16	16	-1.00	0.841
NOV. 09	40	-0.54	0.294	ENE 21	21	-0.82	0.793
NOV. 18	49	-0.17	0.432	ENE 23	23	-0.75	0.773
NOV. 20	51	-0.08	0.468	ENE 30	30	-0.49	0.687
NOV. 23	54	0.04	0.516	ENE 31	31	-0.45	0.673
NOV. 29	60	0.30	0.617	ENE 31	31	-0.45	0.673
DIC. 04	65	0.51	0.695	FEB 8	39	-0.16	0.563
DIC. 05	66	0.55	0.708	FEB 13	44	0.02	0.492
DIC. 07	68	0.63	0.735	FEB 16	47	0.13	0.448
DIC. 15	76	0.97	0.834	FEB 17	48	0.17	0.432
DIC. 17	78	1.05	0.853	FEB 24	55	0.42	0.337
DIC. 23	84	1.30	0.903	FEB 24	55	0.42	0.337
DIC. 24	85	1.34	0.909	MAR 13	72	1.04	0.149
				MAR 18	77	1.22	0.111
				MAR 19	78	1.26	0.103
				MAR 23	82	1.41	0.079
				MAR 26	85	1.52	0.064
				MAR 29	88	1.62	0.052

$$\bar{X} = 52.94$$

$$s = 23.86$$

$$\bar{Y} = 43.45$$

$$s = 27.42$$

$$z = \frac{X - \bar{X}}{s}$$

ESTACION CLIMATOLOGICA: CUQUIO, JAL.

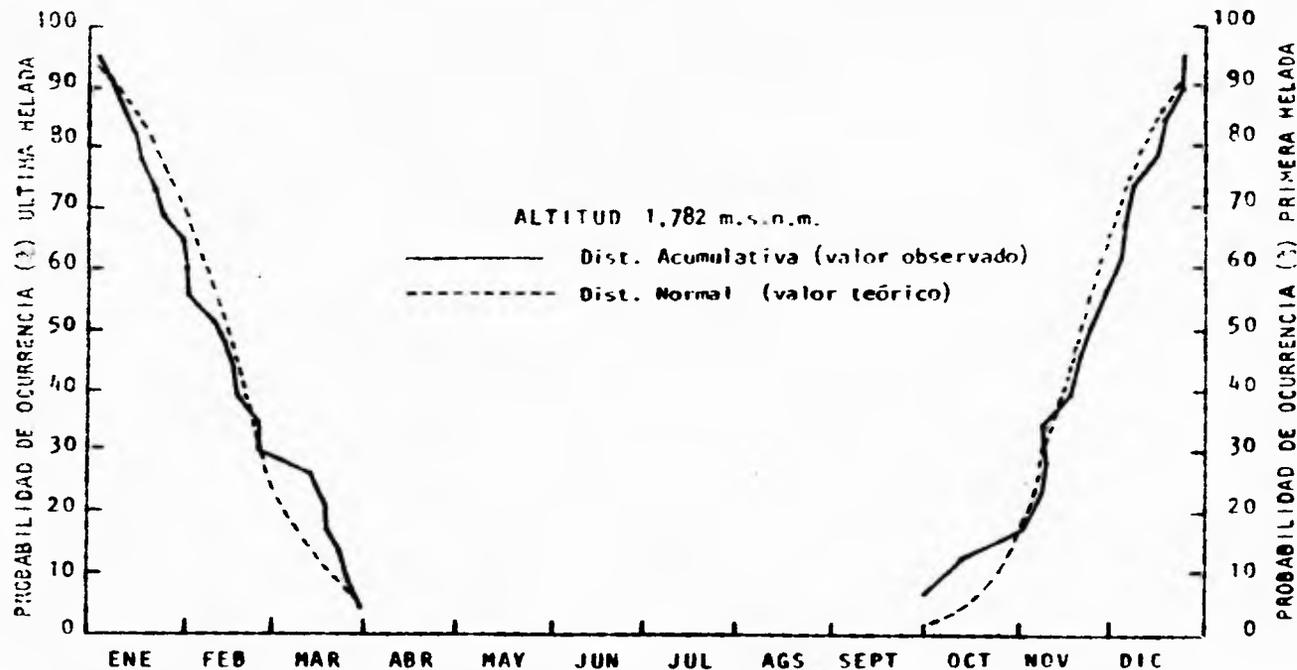


Figura 8.6 Gráficas de distribución acumulativa y normal de última y primera heladas, para la estación climatológica de Cuquio Jalisco. (Villalpando, et al. 1984).

Pronóstico de heladas.

El pronóstico de las heladas se encuentra actualmente reducido a espacios pequeños y a plazos de 24 ó cuando más 48 horas, dados los logros actuales de la meteorología.

Se sabe que ha habido grandes avances, gracias al uso de satélites y de los computadores. para formular los pronósticos del tiempo a nivel macroclimático, el pronóstico de éstas se ha limitado a algunos métodos empíricos que tratan de relacionar los factores ambientales locales con la presencia de bajas temperaturas.

La ausencia de viento, sequía atmosférica, cielo despejado durante la noche y bajas temperaturas al atardecer, son condiciones muy indicativas de la posible presencia de una helada, pero con ello no se puede indicar con seguridad la helada, ni su intensidad, ni la hora en que ocurrirá y tampoco su duración, datos muy necesarios para preparar lo conveniente para luchar contra la helada.

Dos formas sencillas de realizar un pronóstico, inclusive a nivel de predio, es usando un psicrómetro y la figura 8.7, o bien un termómetro simple y la figura 8.8.

En el primer caso se hace una lectura al atardecer (6 de la tarde) y en el segundo caso dos lecturas, una a las 2 de la tarde y otra a las 9 de la noche.

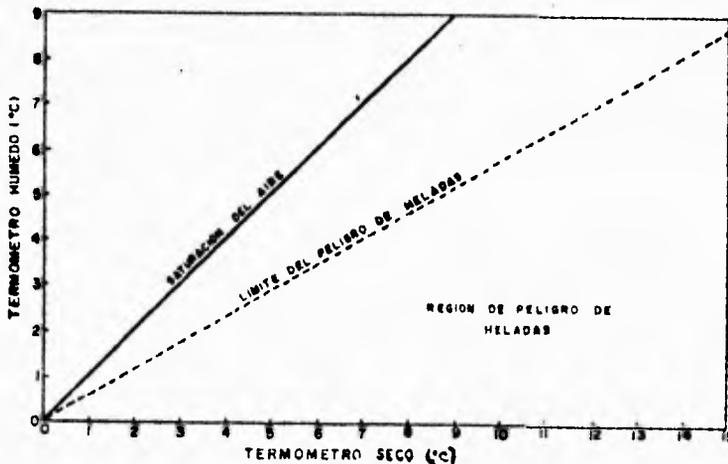


Figura 8.7 Gráfica para pronosticar la posibilidad de helada nocturna usando un Psicrómetro al atardecer. (Arroyo, et al. 1967).

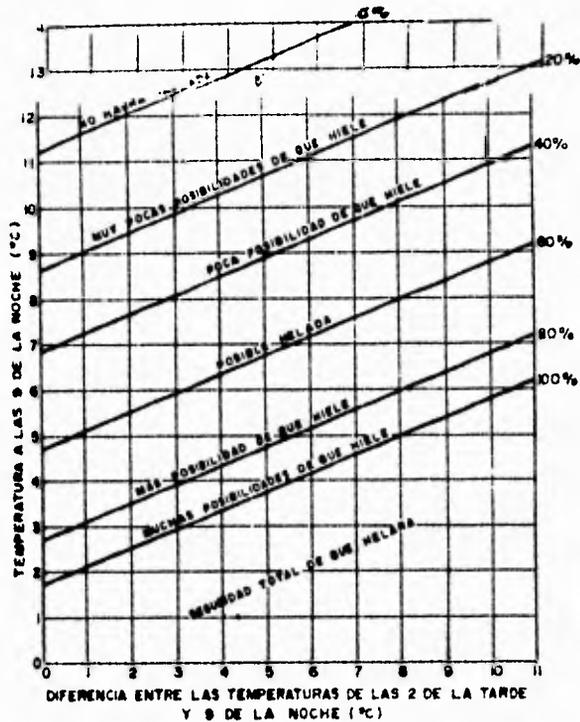


Figura 8.8 Gráfica para pronosticar la posibilidad de helada usando un termómetro a las 2 de la tarde y 9 de la noche. (Calderón, 1977).

Sin embargo, el método más práctico y preciso para pronosticar heladas a muy corto plazo y en espacios reducidos, es el uso de termómetros de alarma, los cuales se accionan cuando la temperatura desciende hasta unos grados arriba de 0° , lo cual permite hechar a andar los sistemas de control con previa anticipación y evitar los daños de la posible helada. Los termómetros de alarma deberán colocarse en las partes más susceptibles o críticas del terreno, como depresiones, entradas de aire frío, etc. con el fin de ofrecer mayor seguridad. Cualquier sistema de control de heladas deberá estar dotado de termómetros de alarma, los cuales pueden ser bimetálicos, eléctricos de mercurio, radio-alarmas, etc. Díaz (1971) describe los principales tipos, pero en esencia no son más que termómetros con dispositivos eléctricos y/o mecánicos que accionan un timbre o una bombilla cuando desciende la temperatura por abajo de cierto límite, anunciando así la inminencia de una helada.

Representaciones gráficas de las observaciones de viento.

¿El clima de una localidad está determinada en gran parte por la dirección predominante del viento.?

El viento cambia continuamente de dirección, para conocer las direcciones predominantes se hace uso de los gráficos de frecuencia, este es el elemento que más se registra, ya que por las características de las estaciones meteorológicas y climatológicas de México, la observación se realiza con la ayuda de la veleta y la rosa de los vientos, el cual se reporta en 16 direcciones diferentes, correspondientes a los puntos cardinales.

La velocidad del viento, aunque es un elemento interesante, lamentablemente en nuestro país se carece del equipo necesario para su estimación, esta velocidad se puede estimar mediante el recorrido del viento en un lapso de tiempo determinado, obteniéndose un valor medio de dicha velocidad. Esto se logra con el uso de los anemómetros y anemógrafos. El anemocinemografo conjuga el registro tanto de la dirección como del recorrido y velocidad instantánea del viento.

Estimación de la dirección del viento dominante.

La dirección del viento dominante es aquella, que para un lugar dado se presenta con mayor frecuencia. Para ello es necesario conocer el número de veces que se ha observado viento procedente de cada una de las 16 direcciones convencionales.

Conocer la dirección del viento dominante tiene importancia por ejemplo, en el diseño de las cortinas rompevientos, en la planeación y establecimiento de huertas frutícolas o terrenos con cultivos anuales, en el diseño y operación de los métodos directos de lucha contra las heladas.

De Fina y Ravelo (1975), proporcionan un método gráfico, para representar la dirección del viento dominante.

El primer paso es tener los datos de frecuencia, es decir, los valores medios normales, para ejemplificar esta representación se utilizara un ejemplo de De Fina y Ravelo (1975).

Se tienen 1095 observaciones tridiurnas cada año, tomadas durante un lapso de 30 años, con el promedio para cada una de las 16 direcciones convencionales, distribuidas de la siguiente manera

Dirección	Frecuencia	Dirección	Frecuencia
N	5	S	62
NNE	32	SSW	30
NE	63	SW	25
ENE	145	WSW	22
E	208	W	18
ESE	179	WNW	9
SE	123	NW	6
SSE	91	NNW	6
		CALMAS	71
TOTAL:1095			

La gráfica se construye con 16 ejes radiales correspondientes a cada una de las direcciones cardinales. Se traza una serie de circunferencias sucesivas, equidistantes y externas a una pequeña circunferencia de frecuencia cero, de manera que vayan indicando las frecuencias 25, 50, 75, 100, etc.

En cada eje se marca la frecuencia correspondiente y al unir los puntos se obtiene un polígono. Las calmas se indican hacia dentro de la circunferencia de frecuencia cero, por medio de una circunferencia menor, trazada según la misma escala que se usó para las circunferencias externas, el anillo resultante conviene destacarlo con un punteado. (figura 8.9).

De Fina (1980), describe este procedimiento, a la vez que sugiere se represente el régimen del viento, la dirección resultante del viento y su frecuencia, es decir el llamado viento resultante.

La determinación gráfica del viento resultante se gráfica considerando la frecuencia de cada dirección como si fuera una fuerza.

En esta forma, la determinación del viento resultante equivale a hallar la resultante de varias fuerzas aplicadas a un punto, problema que se estudia en física.

Para ello, a partir de un punto se sitúan, unas a continuación de otras, las respectivas frecuencias con sus

direcciones. Es conveniente comenzar con el norte y continuar, en riguroso orden, con el , NNE, ENE, siguiendo los puntos cardinales en el mismo sentido de rotación de las manecillas del reloj..

Una vez trazada la última frecuencia, o sea la correspondiente al NNW, se une este extremo de la poligonal con el punto de partida. La recta obtenida indicará la dirección y frecuencia del viento resultante.

Para que el viento resultante tenga un sentido real, es necesario que el gráfico de la frecuencia de los vientos sea asimétrico, por ejemplo en una localidad los vientos soplan exclusivamente de dos direcciones opuestas NNE Y S, el viento resultante resultará de una frecuencia insignificante, próxima a cero. (Figura 8.10).

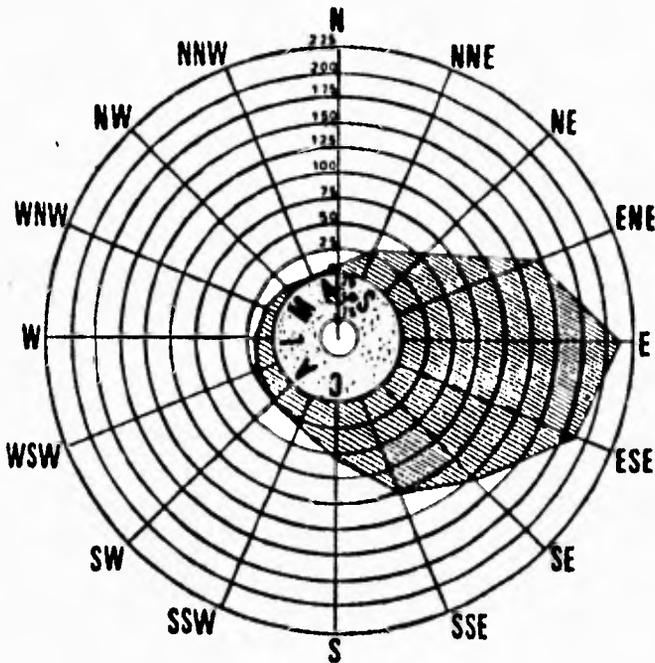


Figura 8.9 Representación gráfica de la frecuencia de las direcciones del viento. (De Fina, 1973).

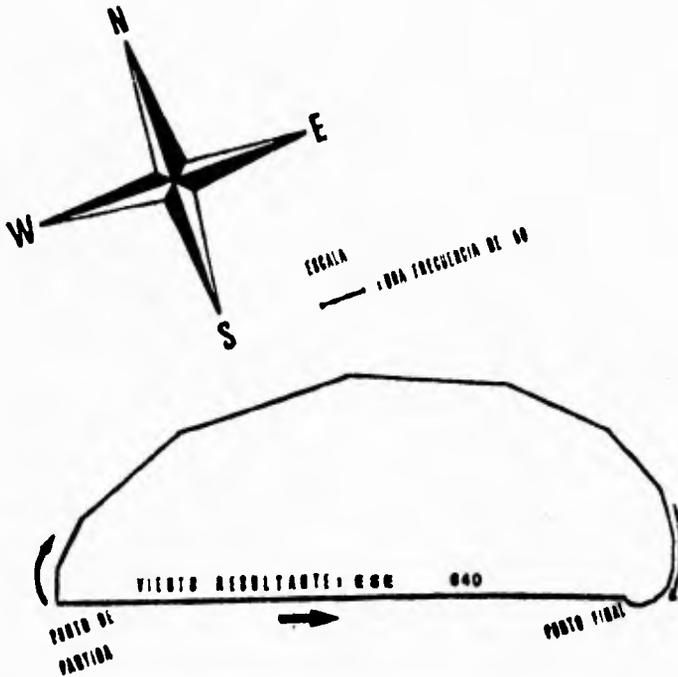


Figura 8.10 Determinación de la dirección resultante del viento y su frecuencia. (De Fina, 1973).

8.4 Influencia del microclima sobre la incidencia de plagas y enfermedades de los cultivos

La producción agrícola puede ser afectada negativamente, debido al ataque de hongos, bacterias y virus fitopatógenos (causantes de enfermedades en las plantas), así como por insectos, ácaros y nematodos fitoparásitos (organismos que viven a expensas de las plantas sin aportarles beneficios).

Las plagas y enfermedades pueden llegar a destruir completamente las cosechas y, aún cuando no lleguen a este extremo, si reducen, y a veces drásticamente, los rendimientos de la mayoría de los cultivos. Se estima que las plagas causan una reducción entre el 10% y el 15% de la producción agrícola mundial. Es interesante hacer notar que los insectos, además de producir daños directamente, pueden ser transmisores de virus, bacterias y otros agentes fitopatológicos.

Tanto en el desarrollo de las enfermedades, como en el de las plagas, tiene gran importancia el microclima prevaleciente en el ámbito del cultivo afectado. Los elementos del clima que tienen mayor efecto sobre la incidencia de enfermedades y plagas son la radiación, la temperatura, la humedad (precipitación, niebla, rocío) y el movimiento del aire (viento).

En el caso de las enfermedades, se considera que un ambiente favorable (constituido especialmente por el microclima) es uno de los tres componentes esenciales para que éstas se produzcan, los otros dos son el hospedante susceptible y el agente causal, que son menos variables; por lo cual el microclima es el que determina, en muchos casos, el desarrollo de una enfermedad y el grado de gravedad del ataque. Las condiciones microclimáticas afectan tanto al hospedante, determinando su susceptibilidad o resistencia, como al agente causal, favoreciendo o limitando su reproducción, y la diseminación de inóculo.

Generalmente, los agentes fitopatógenos se desarrollan bajo condiciones similares a las requeridas por sus hospedantes; no obstante, pequeñas diferencias en sus necesidades pueden favorecer a uno de ellos; pueden habilitar al hospedante para resistir a la infección o aumentar el desarrollo y la gravedad de la enfermedad. Sin embargo, se ha observado que algunos patógenos se adaptan a condiciones variadas, como en el caso del "virus del rayado fino del maíz", que se encuentra desde las regiones costeras -húmedas o secas- hasta las regiones altas y frías de los altiplanos mexicanos o andinos.

El efecto del microclima sobre los insectos puede ser indirecto, al afectar a la disponibilidad de alimento o puede ser directo, afectando a diferentes aspectos vitales tales como: la fase biológica, el desarrollo, la fecundidad, el número de generaciones por ciclo de cultivo, la densidad de la población, la diseminación y el grado de patogenicidad.

8.5 Efectos de los elementos climáticos en la vegetación

Temperatura

Todos los estadios del ciclo de vida de un agente patógeno (esporulación, liberación y germinación de las esporas, penetración, etc.) tienen lugar en un rango determinando de temperatura, fuera del cual, el agente patógeno se inactiva o muere. Por otra parte, hay que tener presente que en su ciclo de vida normalmente se presentan variaciones en cuanto a sus exigencias de temperatura.

La mayoría de los agentes patógenos que habitan en el suelo tiene un crecimiento óptimo a una temperatura de 26°C aproximadamente, la cual, a menudo, coincide con la temperatura óptima para el desarrollo de las enfermedades que causan. En el caso de los patógenos que producen enfermedades en la parte aérea de las plantas, se presenta mucha variación entre especies y en las diferentes fases del ciclo de una especie, en cuanto a sus exigencias de temperatura. Por ejemplo, la *Phytophthora palmivora*, que causa la "mazorca negra" del cacao, se reproduce en forma óptima entre 18°C y 20°C y su desarrollo óptimo se da a 21°C; en cambio, la *Monilia oreri*, que causa la "moniliasis" en el mismo cultivo, tiene su óptima reproducción a 23°C. Por lo general, dentro del rango de temperatura elevada aumenta la actividad y la tasa de multiplicación de los virus dentro de ella. Así, cuanto más alta sea la temperatura, más rápidamente aparecen los primeros síntomas de la enfermedad. Por ejemplo, los síntomas del "enrollamiento de las hojas de la papa" producido por un virus, se atenúan a las temperaturas existentes en las partes altas del volcán Irazú, Costa Rica, pero son muy marcados en las partes bajas y calidad de esa región.

La temperatura óptima para el crecimiento de la mayoría de las bacterias fitopatógenas oscila entre 20°C y 25°C. La mínima se encuentra entre 0°C y 2°C, la máxima, entre 35°C y 37°C, y el punto térmico letal, entre 45°C y 55°C.

La mayoría de los insectos presentan un desarrollo óptimo a temperaturas comprendidas entre 20°C y 30°C.

Los nemátodos tienen exigencias específicas en cada fase de su ciclo biológico (eclosión del huevo, reproducción, etc). Se estima que éstos pierden su actividad entre 5°C y 15°C y entre 30°C y 40°C, presentando su desarrollo óptimo entre 25°C y 30°C. Algunos ácaros han evolucionado hacia formas que presentan en su ciclo estados tolerantes al frío (diapausa), como respuesta a las condiciones predominantes en el invierno, que indica que las respuestas y exigencias de los organismos son el producto de un mecanismo de adaptación al clima.

Humedad

Algunas enfermedades, causadas por organismos que invaden o habitan el suelo, se intensifican por la humedad del mismo. Tal es el caso del "mal de talluelo", causado por varios hongos, y la "marchitez bacteriana", causada por *Pseudomonas solanacearum*. La primera siempre se asocia con exceso de humedad en el suelo y, en el caso de la segunda, la bacteria requiere esta condición para movilizarse. Sin embargo, se presentan otros casos de enfermedades provocadas por "organismos del suelo" (que invaden el suelo o habitan

en él), en que la humedad de éste no tiene efecto sobre ellos o los afecta negativamente.

Los agentes patógenos que producen enfermedades en la parte aérea de las plantas se pueden dividir en cuatro grupos, según sus exigencias de humedad (González, 1976):

a) Los que requieren lluvia, seguida de una alta humedad relativa y de una capa de agua que persista sobre las hojas, tanto para la producción de inóculo como para la diseminación y penetración (ejemplo, las bacterias foliares).

b) Los que requieren condiciones de alta humedad relativa sólo para la producción de inóculo y la diseminación; pero necesitan de agua sobre el hospedante para germinar y penetrar (ejemplos, *Phytophthora*, *Cercospora*).

c) Los que pueden esporular y diseminarse en seco y requieren solamente un período corto de alta humedad relativa para germinar y penetrar (ejemplos, "royas", "carbones").

d) Los que no precisan alta humedad en ninguna fase de su ciclo (ejemplos, los "mildius polvosos").

Lógicamente, los agentes patógenos de los dos primeros grupos causan enfermedades más graves cuanto mayor sea el tiempo durante el cual permanecen mojadas las hojas, lo que ocurre cuando la humedad relativa es alta, no hay viento, el follaje es compacto y el suelo está húmedo. A menudo, la humedad fluctuante, las salpicaduras y otros mecanismos naturales relacionados con el agua influyen en la liberación y en la diseminación de las esporas de muchos hongos. Por ejemplo: la diseminación de *Phytophthora sp.* ("mazorca negra", en el cacao) puede producirse por salpicaduras, por la escorrentía, por el agua de lluvia que cae sobre las partes enfermas o por el agua que escurre por las ramas y tallos. En el caso de esta enfermedad, su efecto puede ser grave si se presentan cuatro o cinco días seguidos de lluvia. La diseminación de *Mycena citricolor* ("ojo de gallo" en el café) y de *Hemilea vastatrix* ("roya" del café) se produce principalmente por salpicadura de las gotas de lluvia. Estos y otros ejemplos, que ilustran el efecto de la humedad sobre el desarrollo y diseminación de enfermedades, se presentan en el cuadro 8.3.

Se puede presentar una interacción entre la temperatura y la humedad; por ejemplo, el hongo *Phytophthora infestans* acelera su actividad cuando la temperatura es menor de 25°C y la humedad relativa es del 90% o más, por lo cual varios métodos para predecir ataques de la enfermedad producida por

este agente patógeno se basan en registros de estos dos elementos.

Los insectos se ven afectados en diversas formas, por las condiciones de humedad del aire (humedad relativa, lluvia, rocío, niebla, etc), del suelo, de la hojarasca o de los tejidos vegetales. La humedad influye sobre las tasas de evaporación, que modifican el agua y la temperatura de su cuerpo, afectando al comportamiento y a la reproducción o facilitando su ataque a los cultivos. Una humedad excesiva puede restringir su actividad, debido a que la producción de alimento puede verse reducida al aumentar las enfermedades fungosas, bacterianas o virosas. En algunas especies de insectos, los huevos permanecen sin eclosionar durante muchos meses, en ausencia de humedad, como ocurre con los saltamontes. La mosca tropical de la fruta *Dacus dorsalis* y *Dacus cucurbitae* requiere niveles precisos de humedad en el suelo para una exitosa pupación y salida del adulto. La mosca *Forcipomyia sp.*, que poliniza el cacao, es más activa si la humedad relativa es alta y hay una ligera llovizna.

Los nemátodos fitoparásitos viven en sitios muy húmedos debido a que precisan una película de agua alrededor de su cuerpo para evitar la deshidratación; además su dispersión se realiza por agua en movimiento, ya sea vertical u horizontalmente en el suelo. Sin embargo, las condiciones de inundación dificultan la alimentación y el intercambio gaseoso de los nematodos.

Radiación

Se ha comprobado que la luz constituye un factor importante en el desarrollo de diversas enfermedades fungosas (cuadro 8.4). En muchos casos, una alta intensidad de radiación y un número alto de horas del sol diarias reducen la gravedad de las enfermedades fungosas, tal es el caso de la "roya" del café, cuyas esporas mueren si, al caer sobre una hoja, quedan expuestas a la radiación solar por algún tiempo. Los rayos solares directos tienen un efecto letal sobre la mayoría de las bacterias fitopatógenas, entre las cuales las de la pigmentación amarilla resiste mejor la radiación que las incoloras. La intensidad de la luz y el fotoperíodo provocan diferentes efectos sobre la multiplicación viral y la presentación de síntomas en las plantas, según el virus de que se trate; pero en términos generales, se admite que la intensidad alta y los días largos favorecen la multiplicación de los virus.

Normalmente una alta intensidad lumínica no es letal para los insectos aún en casos extremos. Frecuentemente, la luz influye en ciertas actividades vitales tales como la atracción hacia el alimento o el comportamiento sexual. Por ejemplo, la mosca de la fruta, *Dacus sp.* realiza el cortejo sexual y la cópula en un período que dura entre media hora y

una hora en el crepúsculo, y la mosca responsable de la polinización en el cacao, *Forcipomyia* sp. es más activa en las horas de la mañana, entre las 5 a.m. y las 10 a.m.

Cuadro 8.3 Efecto de los elementos climáticos sobre algunas enfermedades. (González, 1972).

CULTIVO	NOMBRE COMUN	CAUSA	ELEMENTO CLIMATICO AFECTANTE
Café	Herrumbre o roya	<i>Hemileia bastatrix</i>	Lluvia (salpicadura) disemina las dósporas
Café	Chasparrita	<i>Cercospora Coffeicola</i>	Esporulación con humedad relativa alta. Diseminación de conidios por salpicadura de gotas de lluvia.
Café	Ojo de gallo	<i>Mycena citricolor</i>	Diseminación principalmente por gotas de lluvia.
Papa	Tizón tardío	<i>Phytophthora in infestans</i>	Reproducción con humedad relativa entre un 90% y 100% y temperatura entre 10°C y 20°C. Diseminación de esporangios y zoosporas por el agua y el viento.
Arroz		<i>Pyricularia</i> sp.	Su ataque favorece con un mínimo de ocho a diez horas de humedad relativa superior al 90%.
Maíz y sorgo	Tizón de la hoja	<i>Helminthosporum</i> sp.	Diseminación de conidios por el viento.
Banano	Sigatoka	<i>Mycosphaerella fijiensis</i>	Diseminación de conidios y ascosporas por agua de lluvia y corrientes de aire.
Caña	Raya roja	<i>Xanthomonas rubrilineans</i> (bacteria)	Diseminación por medio de lluvia y viento.
Caña	Mancha ojival	<i>Helminthosporium sacchari</i>	Diseminación de conidios por el viento o por la lluvia.

Cacao	Mazorca negra	<i>Phytophthora palmivora</i>	Diseminación de esporangios y zoosporas por salpicadura y escorrentia.
Cacao	Moniliasis	<i>Monilia roseri</i>	Diseminación de conidios por el viento.
Cacao	Antracnosis	<i>Colletotrichum lindemuthianum</i>	Diseminación por medio del viento y la lluvia.

CUADRO 8.4. La luz como factor que afecta al desarrollo de enfermedades, Fuente: I. DE BAUER. M. DE L. DE LA. 1984.

TRATAMIENTO	EFEECTO	EJEMPLOS
Reducción de la intensidad de la luz.	Aumento en susceptibilidad	<i>Botrytis cinerea</i> en la lechuga y el tomate.
Alta intensidad de luz.	Disminución en susceptibilidad.	<i>Botrytis cinerea</i> en la begonia.
Fotoperíodo corto.	Aumento en susceptibilidad.	<i>Fusarium oxysporum</i> <i>F. lycopersici</i> en el tomate.
Fotoperíodo extremadamente corto o extremadamente largo.	Disminución en susceptibilidad.	<i>Cronartium ribicola</i> en el pino blanco.

Viento

El viento es el agente más común y efectivo de diseminación de muchos hongos fitopatógenos, los cuales están adaptados a este tipo de diseminación mediante la producción y liberación de un número enorme de esporas pequeñas y livianas, suficientemente resistentes al transporte. Este es el caso de *Monilia roseri*, que puede producir en una mazorca esporulada hasta 57 millones de conidios por centímetro cuadrado, y puede mantener en el aire hasta 295 esporas por metro cúbico, según se ha podido detectar mediante trampas especiales.

El viento también puede dispersar quistes de nematodos. Por ejemplo, en Texas se colectaron 28 géneros de nematodos mediante trampas colocadas en el suelo. Por otra parte, la acción desecante del viento, puede afectar negativamente al desarrollo de ciertas enfermedades que requieren alta humedad para su desarrollo.

CAPITULO 9

DETERMINACION DE LA APTITUD AGROCLIMATICA DE UNA REGION

9.1 Introducción

México, como muchos países del mundo, se enfrenta a la imperiosa necesidad de producir alimentos para una población cada vez más creciente. Tal situación ha generado un profundo interés por parte del gobierno y por muchas instituciones en la búsqueda de alternativas viables para la solución de dicho problema.

Nuestro país, México, se caracteriza por su amplia diversidad de condiciones agroecológicas, con fuerte predominio de agricultura de temporal, aproximadamente del 85%. La producción de cultivos en la República Mexicana es muy variable, debido principalmente a las fluctuaciones climáticas que ocurren año con año. Aquí, los cultivos frecuentemente se ven afectados por sequías, heladas, granizo, inundaciones y otros fenómenos climatológicos. Esta situación ha sido en parte responsable de la variación en la producción agrícola en los últimos años.

Para desarrollar una tecnología agrícola enfocada a incrementar y estabilizar la producción de cultivos en áreas de temporal, se considera que es un requisito primario el entendimiento de la variación en tiempo y espacio de los diferentes elementos climatológicos que afectan el rendimiento de los cultivos. Se puede deducir entonces, que es de primordial importancia desarrollar e implementar métodos adecuados para caracterizar el clima y su impacto sobre la producción de cultivos.

El estudio de los factores agroecológicos que intervienen en la producción y productividad de los distintos ambientes, ha tomado diferentes definiciones dependiendo del ámbito científico de que se trate, entre los cuales existe la agroclimatología, que estudia integralmente los aspectos climáticos, hidrológicos, edáficos y biológicos, que intervienen en el desarrollo agropecuario, dichos factores, enfrentan el problema de que son estudiados en forma aislada, sin lograr una integración de los mismos, lo cual es fundamental para la programación forestal y agropecuaria.

9.2 Estudios de Aptitud Agroclimática

Debido a la falta de integración en lo que respecta a la evaluación de recursos naturales, últimamente ha surgido un renovado interés en los denominados estudios integradores y varios métodos y enfoques son presentados, casi todos procedentes de países desarrollados e interesados al respecto.

Cabe señalar, que la mayor parte de los estudios climáticos relacionados con cuestiones agrícolas que se realizan en México, están basados en la información que se recopila de los 109 observatorios y de las 6000 estaciones climatológicas que conforman la Red Meteorológica Nacional, misma que se encuentra integrada de la siguiente forma:

3137	termo-pluvio-evaporométricas
1717	termo-pluviométricas
455	pluviométricas
40	agro-climatológicas
30	pluvio-evaporométricas
68	no han sido identificadas
11	radio sondeo
6	termométricas
662	Transmisión automática

Herrera,(1991), comenta que los parámetros más comunmente determinados son la temperatura, la precipitación y la evaporación; sin embargo, éstos no son los únicos elementos del clima que intervienen en las fases fenológicas de los cultivos y de la vegetación en general. Al respecto la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1963), estableció una Guía para prácticas agrometeorológicas, misma que fue corregida y aumentada en 1982.

En dicha guía, se pretende promover una estandarización de las observaciones meteorológicas que se utilizan para fines agropecuarios en el mundo, especificando el tipo de parámetro y la forma en que deben ser cuantificados dentro de una estación y fuera de éstas; esto último, para obtener conjuntamente con la evaluación de los elementos climáticos, la información básica necesaria para explicar la relación del tiempo y el clima, con los variados aspectos de la agricultura y ganadería. Estas observaciones, deben efectuarse de una manera tal, que constituyan una medida cualitativa y en algunos casos cuantitativa, de las reacciones de la planta y del animal a las condiciones del ambiente.

Los parámetros que determina la OMM para investigación Agrometeorológica, en su mayoría no son determinados por las estaciones climáticas del país. Debido a la gran deficiencia que se tiene en cuanto a la estandarización y recopilación de los datos atmosféricos, algunos investigadores han tenido que realizar metodologías que permitan relacionar algunos parámetros climatológicos con el suelo y la vegetación, considerando la ausencia de estaciones.

En 1974, la Conferencia Mundial de la Alimentación recomienda a la FAO, el establecimiento de un sistema mundial de información y alerta sobre la agricultura y la alimentación; el objetivo de este sistema es entre otros, La vigilancia de los cultivos y el pronóstico de cosechas a escala mundial, con particular atención a los países en desarrollo. A raíz de esto, la FAO propuso una metodología elaborada por Frere y Popov (1980), misma que fue aplicada y evaluada en una amplia gama de ambientes. Este método se basa en el balance hídrico acumulativo registrado a lo largo de la estación de crecimiento completo del cultivo dado, establecido por períodos sucesivos decenales.

El Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), citado por García B. (1982), ha llevado a cabo en el centro de Enseñanza e Investigación en Turrialba (Costa Rica), una serie de programas acerca del estudio de recursos para el desarrollo, recabando un volumen grande de información de todo tipo: suelo, clima, geología, hidrología, recursos socioeconómicos, etc. El problema que se les presentó, fue lograr una integración de la información. Ante esta situación, el IICA en turrialba realizó estudios con cierto grado de unificación, que culminaron en proyectos concretos de regionalización (1969, 1970, 1971), de zonificación agropecuaria (1969), y de la zonificación de cultivos (1971) en distintos países.

Vinogradov (1967) y Rozanov (1973), establecen que algunos de los estudios de los elementos físico ambientales, se fundamentan en el sistema de paisajes característicos, en base a una evaluación de distintos patrones fotográficos, para identificar distintos panoramas; García B. (1982), señala que este enfoque es más apto para estudios preliminares, de algún plan de desarrollo que necesite el conocimiento predictivo del potencial productivo del área; así Vinogradov (op. cit.), recomienda determinar áreas claves y perfiles de paisajes concretos, para lograr una mayor precisión al respecto.

Algo similar propone Ortiz (et al , 1984) en su metodología para un levantamiento fisiográfico, que lo considera como una subdivisión del paisaje, en donde introduce el concepto de "faceta", como una unidad básica de clasificación y la define como una porción de la superficie terrestre, usualmente con una forma simple, sobre una misma

roca ó depósito superficial y con un suelo o régimen de humedad que son uniformes o varían en forma simple y constante. Este tipo de enfoque, permite la posibilidad de completar los estudios tendientes a predecir rendimientos de cultivos, así Rozanov (op cit.) establece como ideal el conocimiento del pronóstico y predicciones en base a modelos estadísticos y probabilísticos; es decir, se hace énfasis, en la necesidad de tratar de lograr una integración de la componente climática y edáfica; el problema radica en que la componente estipulado, no es tratada con la exhaustividad necesaria para lograr predicciones del potencial productivo de las áreas en estudio.

García B. (1982), señala que las interrelaciones de estudios agroclimáticos y fisioedáficos a distintos niveles de detalle, darán lugar a resultados con un gradiente de precisión denominado "zonificación de punto", que pertenece a un nivel de precisión estricto y tiene como principal objetivo, llevar a cabo un análisis exhaustivo, de los rendimientos que se pueden alcanzar en una localidad, sitio o conjunto de sitios con suficiente información climatológica y edáfica. Con esta zonificación, se puede presentar el análisis espacio-tiempo, que permite conocer la distribución de los rendimientos en el espacio geográfico y en el tiempo para cada localidad o punto, así como interrelacionarlo con variables de manejo que permitan optimizar el rendimiento y el ingreso a través de modelos de riesgo; a este nivel de precisión se consideran como variables edafoclimáticas de mayor impacto, a la tensión del agua en el suelo y su transcurso diario.

Como análisis especial complementario, se determinan las probabilidades de lluvia y puede ser usado para análisis de riesgo de sequía.

Debido a la cantidad de información requerida para realizar la zonificación anteriormente mencionada, ésta es muy difícil de emplearse en México, debido a la falta de parámetros necesarios para su realización.

En México se han realizado varios estudios tendientes a caracterizar la disponibilidad y variación de algún elemento climático, o bien estudios para regionalizar la siembra de uno o varios cultivos, principalmente con base en su rendimiento potencial (García, et al, , 1973; García-Benavidades, 1979; Placios, 1978; Distritos y Unidades de Temporal, 1980; S.P.P., 1981; Vidal, 1980; Ortiz, 1982; Turrent, 1981; y Villalpando, 1984). En la mayoría de los trabajos desarrollados por los autores antes mencionados, se han utilizado datos climatológicos a mensual o estacional, los cuales son períodos muy amplios, y desde el punto de vista agroclimático, no permite captar con el grado de precisión deseado, la variabilidad climática y su efecto sobre el rendimiento y producción de cultivos.

Por otra parte, en este tipo de estudios no se ha estratificado el ambiente en forma integrada, es decir, determinando todos aquellos parámetros agroclimáticos para períodos cortos de tiempo (5-10 días), que permiten por un lado estimar el potencial agroclimático regional y por el otro, establecer relaciones entre estos parámetros agroclimáticos y la tecnología de producción generada para una región determinada.

Villalpando, et al, en su proyecto de caracterización agroclimática del área de influencia de los campos agrícolas experimentales de la zona centro, del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), propone utilizar los datos climatológicos en forma decenal, este objetivo solo se cumplió para los sitios donde se encontraban estaciones climatológicas dentro de los campos experimentales del INIA y para el resto de estaciones se calcularon los índices agroclimáticos con datos en forma mensual, debido a que no se pudo contar con la base de los datos climatológicos de todos los sitios seleccionados.

Moreno, et al. (1993), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), realiza un trabajo innovador, basándose en el estudio propuesto por Villalpando, este estudio fue realizado utilizando tecnología de vanguardia, resultando 32 documentos denominados Guía Ejecutiva del Potencial Productivo Vegetal, para cada uno de los estados de la República Mexicana.

9.3 Aspectos Generales sobre el Proyecto de Zonas Agroecológicas

La zonificación agroecológica se ubica dentro del campo de la evaluación de tierras, cuyo objetivo es el establecer el uso más adecuado de los terrenos. Considerando para ello, cultivos específicos desarrollándose bajo condiciones de temporal, con una producción sostenida y sin causar deterioro de los recursos naturales.

Las proyecciones realizadas por Naciones Unidas en 1976 revelaron que para alimentar y vestir a la población del año 2000 sería necesario incrementar la producción agrícola en un 60%. Ante esta situación surgió la interrogante sobre si en nuestro planeta existiría suficiente tierra para lograrlo.

Dicha cuestión da origen al proyecto de "Zonas Agroecológica", en el cual a diferencia de trabajos previos, serían estudiados cultivos en forma individual, debido a que los requerimientos ambientales son diferentes para distintos cultivos. Además se contemplarían dos niveles de inversión,

uno bajo para caracterizar a una agricultura de subsistencia con poca disponibilidad de capital, herramientas manuales, mano de obra familiar no pagada y tierra muy fraccionada, y otro alto, para evaluar una agricultura comercial, altamente tecnificada y con grandes extensiones de tierra. Ambas bajo condiciones de temporal, es decir sin control del agua en sistemas de riego.

La distinción de los niveles de inversión es importante debido a que pueden presentarse situaciones como: plagas, en una agricultura de subsistencia probablemente no sean controladas; en suelos muy arcillosos al trabajarlos con herramientas manuales se considerarían como no aptos y al usar maquinaria serían muy adecuados, o bien, en condiciones de pendientes fuertes el uso de maquinaria no sea posible, pero, sí, puedan emplearse herramientas manuales.

Las primeras experiencias de este proyecto fueron desarrolladas en Africa, Asia, y Latinoamérica y la metodología propuesta consta de :

1. Un inventario climático.
2. Un inventario de suelos.

El proyecto se apoya en algunos principios fundamentales, de los cuales, Ortiz (1986) menciona tres por considerarlos básicos en los objetivos que se pretenden lograr:

1) La aptitud de las tierras es significativa solamente en relación a un uso específico, es decir, cada uso se evalúa independientemente como si no existiera ningún otro uso y si un terreno resulta apto para el cultivo de maíz no necesariamente será apto para el cultivo de frijol u otro uso;

2) La aptitud se refiere a un uso en base sostenida, lo cual implica que el uso específico que se da a las tierras no provocará su degradación a través de los procesos de erosión hídrica, erosión eólica o salinización;

3) El enfoque adaptado es multidisciplinario, es decir, involucra consideraciones de ecólogos, agrónomos, economistas, climatólogos, además de los edafólogos para la evaluación de la aptitud de las tierras para usos específicos.

Procedimiento.

La forma como se realiza la evaluación de la aptitud de las tierras se ilustra en la figura 9.1. Una vez seleccionado el cultivo y el nivel de inversión, se procede a establecer la adaptabilidad del cultivo en el área, lo

cual se logra por medio de las divisiones climáticas mayores que se basan en la temperatura o altitud. Si el cultivo se adapta, se determina si la unidad de suelos es un "fluvisol" (J), ya que los suelos aluviales tienen un comportamiento diferente al resto de las unidades de suelos, aplicandose reglas para deficiencias y excesos de humedad. Si no es fluvisol el suelo, entonces, se analiza la duración del período de crecimiento. Para determinar el período de crecimiento se emplean datos de precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura, y de acuerdo a la duración de este período se clasifica a la zona en : MUY APTA (MA), APTA (A), MARGINALMENTE APTA (MA) o NO APTA (NA). Las clases climáticamente aptas (MA, A y ma) son finalmente evaluadas de acuerdo con los tipos de suelos presentes en el área.

El factor suelo se analiza de acuerdo a las unidades del sistema de clasificación FAO/UNESCO, junto con la información complementaria que proporcionan los mapas de suelos, es decir, además de las unidades se califican por fases, por clase de pendiente y por clase textural. Cada una de estas características del suelo degradan o mantienen la clase de aptitud para el cultivo y nivel de inversión considerado. Si el suelo es limitante modificará la clase de aptitud degradandola o incluso se puede llegara a considerar el área como no apta. Si no es el suelo limitante la clasificación agroclimática se mantiene. Finalmente, se evalúa la pendiente de forma similar al suelo.

A cada clase de aptitud se le determina su superficie, la que se debe reportar en los resultados.

Originalmente fueron estudiados 12 cultivos los cuales son : trigo, arroz (inundado), arroz (sin inundar), maíz, mijo, sorgo, soya, algodón, frijol, papa, camote y yuca. En 1981 se amplió el número a 17 incluyendo a la cebada, a las plantaciones de plátano, cacahuete, caña de azúcar y palma de aceite. .

Fuentes de información:

- 1) Carta de Altimetría, utilizada para delimitación de las Divisiones Climáticas.
- 2) Datos de las Estaciones Climatológicas. Para el calculo de los períodos de crecimiento para cada estación.
- 3) Mapa de Unidades de Unidades de Suelo, según el Sistema FAO/UNESCO.

La sobreposición de los tres mapas produce en general las clases de aptitud.

9.3.1 Inventario Climático.

La elaboración de un inventario climático de acuerdo a los lineamientos de FAO (1978, 1980 y 1985) consta:

- a) Definición de las divisiones climáticas mayores, y
- b) Obtención de Períodos de Crecimiento.

Divisiones Climáticas

Para definir las divisiones climáticas la temperatura media mensual se reduce al nivel del mar, las áreas con temperaturas reducidas mayores a 18°C son denominadas como tropicales y los menores a 18°C subtropicales. Si la temperatura media diaria durante el período de desarrollo de cultivos es mayor a 20°C se le denomina caliente, si la temperatura esta entre 15 y 20°C moderadamente templada, si esta entre 10 y 15°C templada y si es menor a 10°C fría.

Con las dos características anteriores se establecen las divisiones climáticas denominándolas como tropical caliente o subtropical fría.

Para cada división climática existe un grupo de cultivos que son potencialmente adaptables, como se muestra en el cuadro 9.1.

Las divisiones climáticas fueron definidas con base en los requerimientos térmicos de cultivos, que limitan su distribución a escala global.

Para establecer las divisiones climáticas mayores, como primer paso se considera el efecto de la latitud, en espacio y tiempo, sobre la temperatura media. Para lo cual, la temperatura media mensual se reduce a nivel del mar, considerando un gradiente altotérmico de 0.5°C/100 m de elevación. Si todos los meses resultan con una temperatura media mayor a 18°C se denomina TROPICAL, cuando existe un período con temperaturas medias mensuales menores a 18°C pero mayores a 5°C se le llama SUBTROPICAL y cuando estos últimos son menores a 5° se designa TEMPLADA. Las zonas subtropicales son a su vez divididas de acuerdo a la estación lluviosa (esto es, subtropical con lluvias en invierno o subtropical con lluvias en verano).

Posteriormente se considera el efecto de la altitud sobre las temperaturas medias durante el período de crecimiento (y por ende de la distribución de cultivos) y las divisiones tropicales y subtropicales con lluvias en verano se dividen en cuatro climas mayores, esto es : caliente (>20°C), moderadamente fresco (15°-20°C), fresco (5°-15°C) y frío (<5°C).

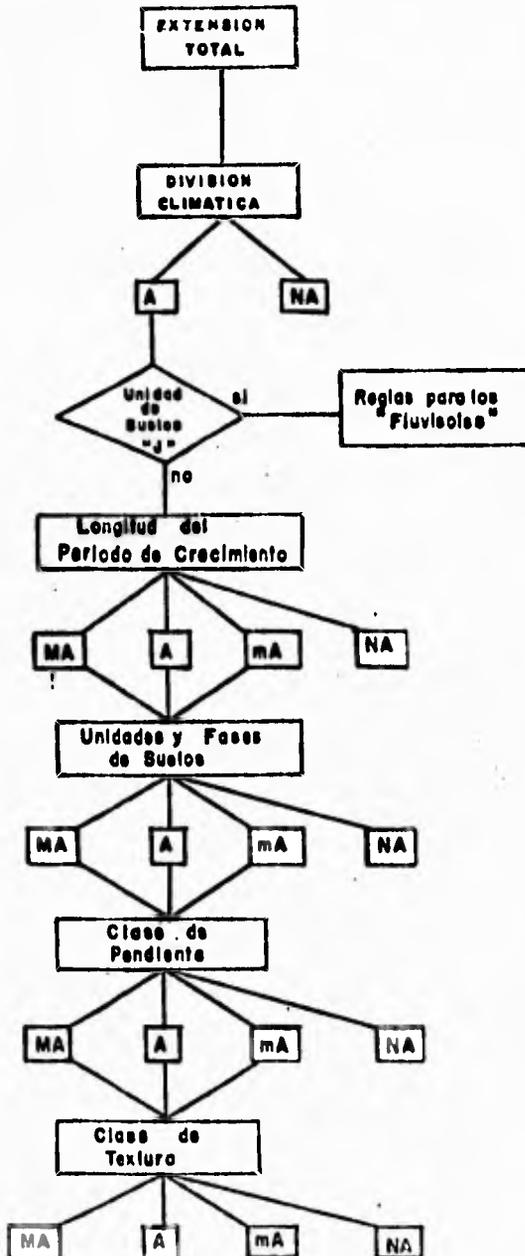


Fig 9.1. Procedimiento para evaluar la aptitud de las tierras (FAO, 1978).

Las divisiones subtropical con lluvias en invierno y templada son divididas a su vez en dos climas mayores (frescos y fríos).

Lo anterior origina un total de 14 climas mayores para el mundo, como se muestra en el cuadro 9.1.

Divisiones climáticas en México.

A partir de la información publicada por P. Mosiño y Enriqueta García (1966) es posible establecer que en la mayor parte de la República Mexicana se tiene una temperatura media anual mayor a 18°C , con lo cual sería suficiente para ubicar a nuestro país en la categoría de tropical. Sin embargo, para ser más consistente con lo expuesto en los párrafos anteriores, se muestra en el cuadro 2 las temperaturas medias anuales, la altitud y la temperatura reducida a nivel del mar de 15 observatorios. La forma como se reduce la temperatura a nivel del mar consiste en multiplicar la altura del lugar en metros por el factor 0.005, que corresponde a un gradiente altotérmico de $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ y sumar el resultado del producto a la temperatura del lugar.

A continuación se define si es caliente, templado o frío, para lo cual se requiere la temperatura media diaria durante la etapa de desarrollo del cultivo. Como se trata de una evaluación bajo condiciones de temporal, se investigaron los meses dentro de los cuales ocurría la mayor cantidad de precipitación (80-90%) y de acuerdo con Mosiño y Enriqueta García (1966) esto sucede entre los meses de Mayo a Octubre, considerándose que la temperatura media diaria de esos meses sería representativa del dato requerido. Sin embargo, tal dato no siempre es disponible por lo que se creyó adecuado buscar una relación con un dato de temperatura más general con representación cartográfica, específicamente su selección a la media anual. En la fig.9.2 se muestra el procedimiento a seguir para las divisiones climática para México.

La representación cartográfica de la temperatura en nuestro país (carta climática del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de la SPP, escala 1:500,000) contiene isotermas de 20° , 16° y 10°C , las cuales, con fines prácticos, pueden adoptarse solo los límites de las divisiones climáticas. Así áreas con temperaturas medias anuales mayores a 20°C son consideradas como tropical calientes, de 16° a 20°C como tropicales moderadamente templadas, de 10° a 16°C como tropicales fríos.

Cuadro 9.1 Climas Mayores (FAO, 1980)

C l i m a	Climas mayores durante el período de crecimiento		Régimen de temperatura media diaria (°C) durante el período de crecimiento	Apto para la consideración del grupo de cultivos ^{1/}
	No.	Nombre Descriptivo		
TROPICALES Todos los meses con temperaturas medias mensuales corregidas a nivel del mar, mayores a 18°C	1	Tropicales calientes	Más de 20	II y III
	2	Tropicales moderadamente frescos	15 - 20	I y IV
	3	Tropicales frescos	5/10 - 15	I
	4	Tropicales fríos	Menos de 5	No apto
SUBTROPICALES Uno o más meses con temperatura media mensual corregida a nivel del mar, menor a 18°C, pero todos los meses mayores a 5°C	5	Subtropicales (lluvias en verano) calientes/moderadamente frescos	Más de 20	II y III
	6	Subtropicales (lluvias en verano) calientes/moderadamente frescos	15 - 20	I y IV
	7	Subtropicales calientes (lluvias en verano)	Más de 20	II y III
	8	Subtropicales moderadamente frescos (lluvias en verano)	15 - 20	I y IV
	9	Subtropicales frescos (lluvias de verano)	5/10 - 20	I
	10	Subtropicales fríos (lluvias de verano)	Menos de 5	No apto
	11	Subtropicales frescos (lluvia de invierno)	5/10 - 20	I
	12	Subtropicales fríos (lluvia de invierno)	Menos de 5	No apto
TEMPLADOS Uno o más meses con temperatura media mensual corregida a nivel del mar menor a 5°C	13	Templados frescos	5/10 - 20	I
	14	Templados fríos	Menos de 5	No apto

^{1/} Véase Cuadro 9.1.A.

Cuadro 9.1.A. Grupos de Adaptabilidad de Cultivos , con base en la forma fotosintética y respuesta a la radiación y temperatura (FAO, 1985)

Grupo de Adaptabilidad de Cultivos	I	II	III	IV	V
Forma Fotosintética	C3	C3	C4	C4	CAM
Temperatura Optima para fotosíntesis (°C)	15-20	25-30	30-35	20-30	25-35
Principales Cultivos	Remolacha Frijol Trigo Cebada Avena Papa Haba (TE) Garbanzo	Soya (TR) Frijol Arroz Yuca Camote Ñame Haba (TR) Cacahuete Algodón Tabaco Plátano Cocotero Caucho Palma de Aceite	Sorgo (TR) Maíz (TR) Mijo Panicum Setaria Caña de Azúcar	Panicum Mijo (TE, TH) Sorgo (TE, TH) Maíz (TE, TH) Setaria	Henequén Piña

Períodos de Crecimiento.

Un período de crecimiento se considera como el número de días durante el año en los que existe disponibilidad de agua y temperaturas para el desarrollo de un cultivo.

Metodológicamente el período de crecimiento es el número de días durante el año en el cual la precipitación (P) excede a la mitad de la evapotranspiración potencial, más el período requerido para evapotranspirar 100 mm de agua proveniente del exceso de precipitación (o menos si no es disponible) y almacenada en el perfil del suelo. (Figura 9.3) Adicionalmente, en cualquier intervalo de tiempo durante el cual existe disponibilidad de agua, si la temperatura es muy baja ($<5^{\circ}\text{C}$) para el desarrollo de una planta se elimina.

De acuerdo a lo anterior, el período de crecimiento se calcula en base a la disponibilidad de agua y por temperatura.

Período de crecimiento por disponibilidad de agua.

Para el cálculo del período de crecimiento por la disponibilidad de agua se efectúa un balance de humedad comparando la precipitación (P) con la evapotranspiración potencial (ETP). Los datos de P y ETP son mensuales, aunque se ha indicado que puede ser en períodos de 10 días (FAO, 1985) y la ETP es estimada con el método de Penman.

En la figura 9.4. se muestran los tipos de períodos de crecimiento, según FAO (1978). En el período de crecimiento **NORMAL** se muestra que el período inicia cuando la $P=0.5$ ETP y también se le denomina a este punto inicio de las lluvias. Cuando P es mayor a la ETP se tiene un período húmedo, en esta etapa al existir un exceso de agua se supone que hay un almacenamiento en el perfil del suelo. Posteriormente cuando $P=0.5$ ETP se considera como la terminación de la temporada de lluvias, después de la cual la planta puede seguir viviendo con el agua almacenada en el suelo. El valor de 100 mm de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, es un valor promedio entre la capacidad de almacenamiento para suelos someros 50 mm y suelos profundos (150 mm),

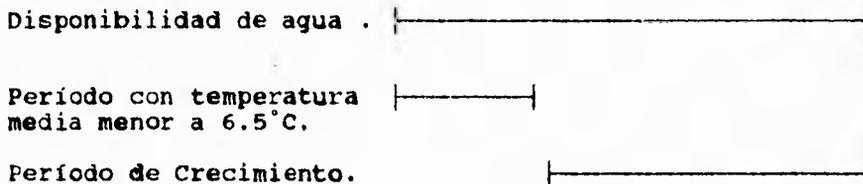
Otro tipo de período de crecimiento es el **INTERMEDIO** cuya diferencia con el normal se debe a la falta de período húmedo, es decir, no existen excesos de agua o no hay reservas de humedad en el suelo. Esta situación origina que el inicio y la terminación de la temporada de lluvias coincida con el inicio y la terminación del período de crecimiento. En el período **HUMEDO TODO EL AÑO** la P es mayor a la ETP en todos los meses, por lo que se considera un período de crecimiento de 365 días, y; en el período **SECO TODO EL AÑO** la P es menor a 0.5 ETP, resultando que no

existe humedad para el desarrollo de una planta, considerados como un período de 0 días.

Período de crecimiento por disponibilidad de agua y temperatura.

Una vez calculado el número de días con disponibilidad de agua, estos valores son reanalizados de acuerdo a la temperatura, si la temperatura media es menor a 6.5°C se elimina ese período.

Así por ejemplo se puede presentar la situación siguiente:



Período de crecimiento en México.

No es posible aplicar la metodología de FAO íntegramente a nuestro país y probablemente en los países de crecimiento esta situación es más notoria. Uno de los datos necesarios es la ETP calculada con el método de Penman, para lo cual es indispensable contar con datos de horas de insolación y velocidad del viento, que carecemos de ellos. Esto obligó a buscar otras alternativas y al parecer la más simple es estimar a la ETP en base a la evaporación (Ev) con la fórmula:

$$ETP = 0.8 Ev$$

de acuerdo a las definiciones de la Organización Meteorológica Mundial y a los trabajos de García-Benavides (1979).

Otro aspecto fue en relación a la temperatura, al no contar con datos de temperatura diaria se optó por eliminar los meses que tuvieran una temperatura media mínima inferior a 6.5 °C, ya que existen suficientes evidencias para establecer que a dichas temperaturas habrá al menos una helada en México.

En el cuadro 9.2 se muestran los datos de 4 estaciones de nuestro país para el cálculo del período de crecimiento y en la Fig. 9.5 sus gráficas.

DIVISIONES CLIMATICAS PARA MEXICO

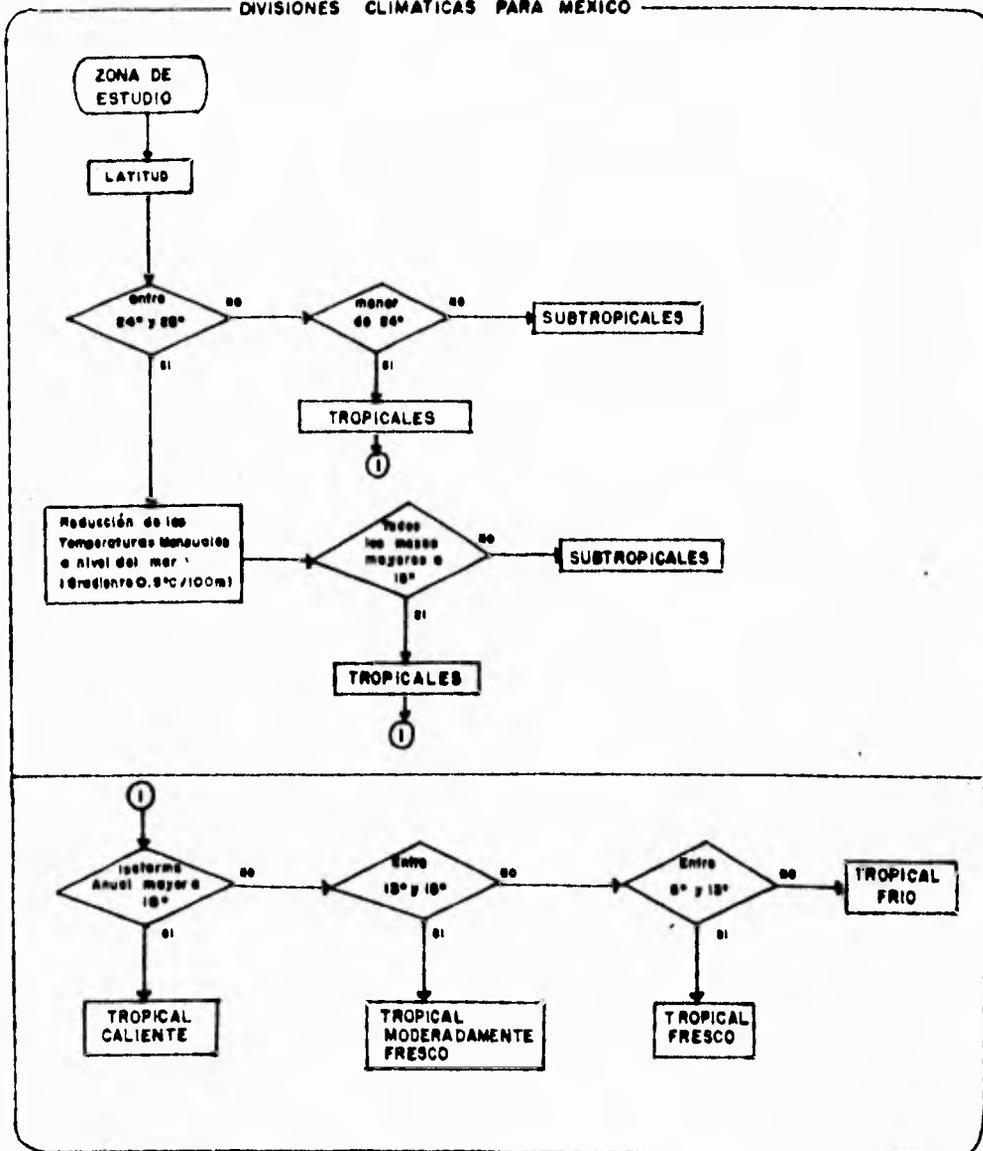
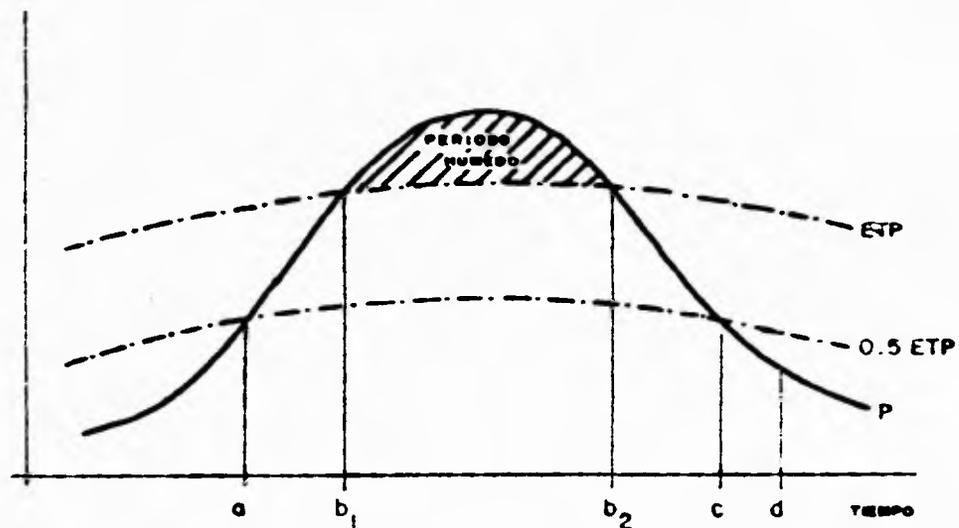


Figura 9.2 Divisiones climáticas para México. (Ortiz S., 1984).



- a. Inicio del Período de Crecimiento y de la Temporada de Lluvias
- b₁ y b₂ inicio y final del Período Húmedo.
- c. Término de la Temporada de Lluvias.
- d. Término del Período de Crecimiento

Figura 9.3 Período de Crecimiento.
(FAO, 1978).

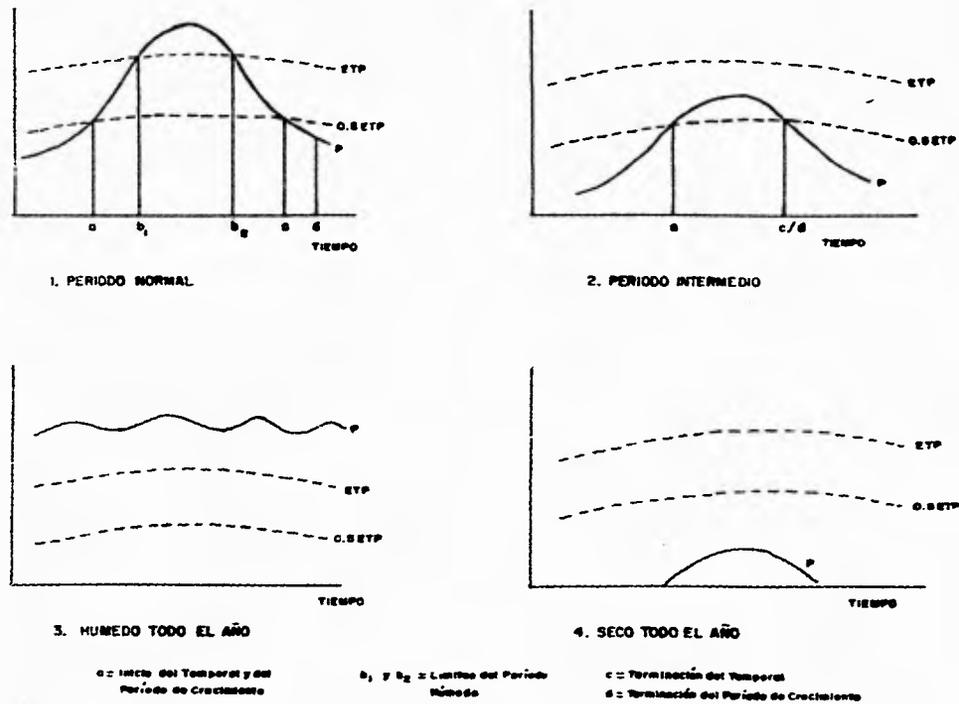


Figura 9.4 Tipos de Periodos de Crecimiento. (FAO, 1978).

Cuadro 9.2 Datos utilizados en el calculo del periodo de crecimiento en cuatro estaciones de la República Mexicana. (Ortiz S. 1981).

ESTACION	Elemento	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
PUEBLA, PUE.	Ev	133.8	153.6	217.2	206.8	179.6	124.6	124.1	119.9	101.0	123.5	120.1	119.9
	ETP ^{1/}	107.0	122.8	173.7	165.4	143.6	99.6	99.2	95.9	80.8	98.8	96.0	95.9
	0.5 ETP	53.5	61.4	86.8	82.7	71.8	49.8	49.6	47.9	40.4	49.4	48.0	47.9
	<u>P</u>	7.6	5.0	6.1	27.5	70.3	147.2	128.3	162.1	159.2	72.5	22.6	6.0
	Tm ^{2/}	6.7	8.0	10.5	11.9	12.6	13.0	12.0	12.2	12.0	10.3	8.4	6.8
JALAPA, VER.	Ev	85.8	87.4	117.3	137.5	132.2	121.5	112.9	121.5	94.1	96.2	87.2	82.5
	ETP	68.6	69.9	93.8	110.0	105.7	97.2	90.3	97.2	75.2	76.9	69.7	66.0
	0.5 ETP	34.3	34.9	46.9	55.0	52.8	48.6	45.1	48.6	37.6	38.4	34.8	33.0
	<u>P</u>	43.2	46.1	54.7	59.8	101.8	265.8	209.1	183.5	260.0	128.3	60.4	41.3
	Tm	10.8	11.5	13.4	15.6	16.2	16.2	15.5	15.8	15.8	14.4	12.9	11.5
LA PAZ, BAJA CALIF.	Ev	169.2	155.9	184.8	172.8	173.2	170.2	182.9	192.3	182.8	182.8	172.9	173.5
	ETP	135.2	124.7	147.8	138.2	138.5	136.1	146.3	153.8	146.2	146.2	138.3	138.8
	0.5 ETP	67.6	62.3	73.9	69.1	69.2	68.0	73.1	67.9	73.1	73.1	69.1	69.4
	<u>P</u>	14.7	3.5	2.0	1.1	0.2	2.4	13.2	36.4	65.3	12.7	5.4	20.1
	Tm	12.6	12.9	13.2	14.8	16.8	19.1	23.3	23.9	23.5	20.4	16.8	13.7
STA. MARIA, YURIRIA	Ev	118.4	136.1	201.7	223.2	237.2	218.0	172.5	172.8	154.2	140.7	115.4	104.6
	ETP	94.7	108.8	161.3	178.5	189.7	174.4	138.0	138.2	123.3	112.5	92.3	83.6
	0.5 ETP	47.3	54.4	80.6	89.2	94.8	87.2	69.0	69.1	61.6	56.2	46.1	41.8
	<u>P</u>	15.9	6.3	5.9	14.0	32.9	142.7	136.3	130.3	112.9	56.1	13.6	9.0
	Tm	5.7	7.0	9.0	11.5	13.6	14.6	13.8	13.7	13.5	10.9	8.2	6.0
GRANJUNTO													

^{1/} ETP = 0.8 Ev

^{2/} Tm = Temperatura Media Mínima

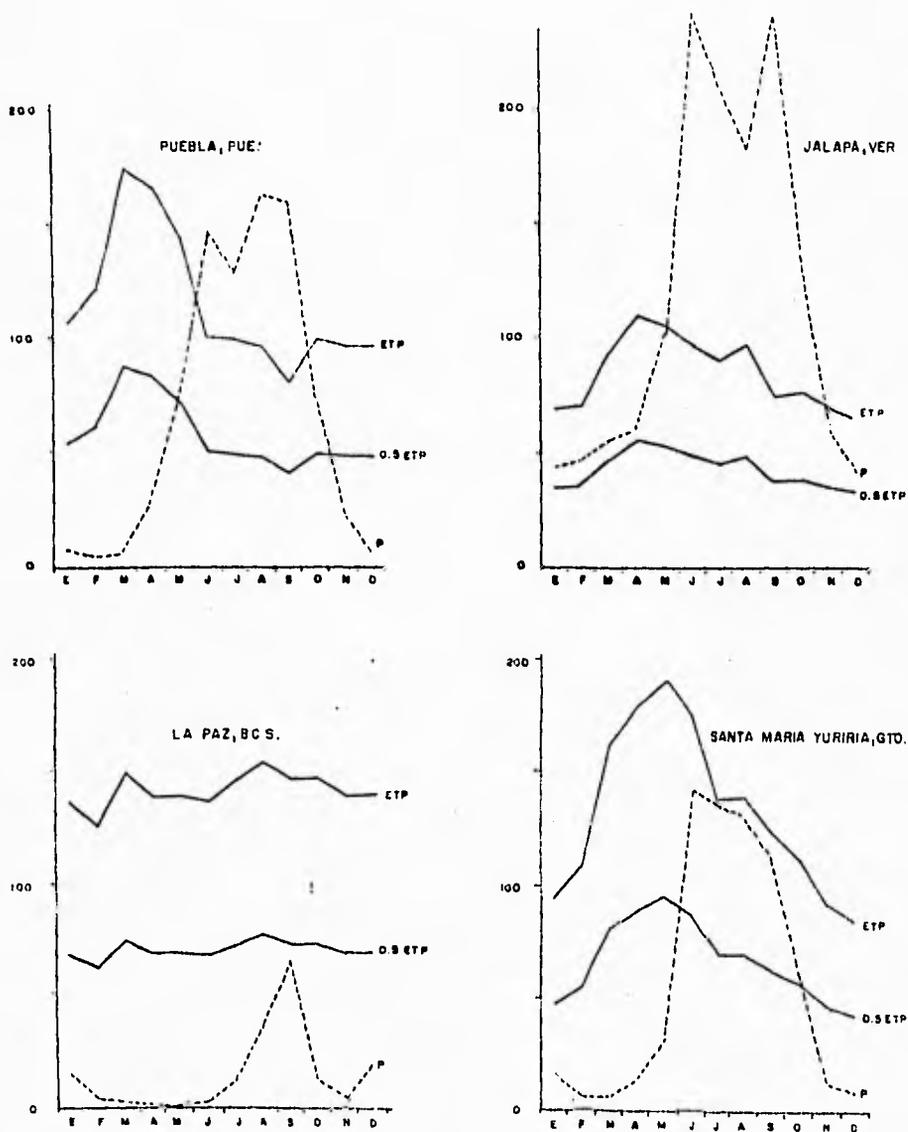


Figura 9.5 Gráficas de los periodos de crecimiento de cuatro estaciones de la República Mexicana. (Ortiz, 1981).

Cada estación puede ubicarse sobre un mapa y trazar isolíneas de duración de periodos de crecimiento cada 30 días.

Pájaro (1984) usando la información generada por Ortiz (1981), estableció un modelo para estimar los periodos de crecimiento a partir de la precipitación anual, es cual es:

$$Pc = 0.24 \text{ ó } 89 (PT) - 0.0000372 (PT)^2 - 33,1019$$

Donde:

PC = período de crecimiento , en días
Pt = precipitación anual, en mm

con

$$Fc = 588.01 **, R2 = 0.798372 \text{ y } n = 300$$

Este modelo ha resultado sumamente útil, debido a que con él se evita el dato de ETP, pero se tuvo el inconveniente de no saber las fechas de inicio y terminación del PC. Además con el modelo un mapa de isoyetas anuales se transforma en un mapa de PC. En la figura 9.6 se muestra el procedimiento en el que se aplican las fórmulas obtenidas por Pájaro (1984) y Ortiz (1986) para resolver el problema de la escasez de datos. Ortiz (1986) estableció una relación entre la fecha de inicio del PC (IPC) y la duración del PC (DPC), para 95 estaciones. La DPC varía de 75 a 270 días y el IPC fué codificado de 1 a 365, esto es 1 para el primero de enero y 365 para el 31 de diciembre, para tener la facilidad de conocer este dato se puede utilizar un calendario juliano.

El modelo es lineal simple de la forma siguiente:

$$IPC = 210.3526 - 0.3976 (DPC)$$

Con $r = -0.8776$ y $n = 95$, altamente significativo (Ortiz, 1986).

Clasificaciones Agroclimáticas

A partir de los PC generó una clasificación Agroclimática por División climática y nivel de Inversión para la producción de cultivos específicos bajo condiciones de temporal. Estableciendo para ello cuatro clases de aptitud: Muy Apta (MA), Apta (A), marginalmente Apta (mA) y No Apta (NA). (Figura 9.1).

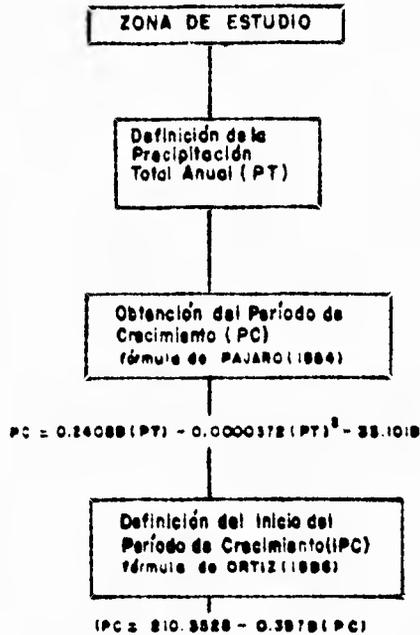


Figura 9.6 Procedimiento para estimar los períodos de crecimiento para México. (Pájaro y Ortiz, 1984).

En el cuadro 9.3 se muestran las clasificaciones agroclimáticas para los 17 cultivos estudiados. Resulta entonces que, para clasificar la aptitud Agroclimática de una zona para la producción de un cultivo se determina el período de crecimiento y se establece la clase a la cual pertenece, de acuerdo con la división climática y nivel de inversión seleccionado.

9.3.2 Inventario edáfico.

Después de evaluar la zona para la producción de un cultivo desde el punto de vista climático se analiza si dispone o no de suelos adecuados para su producción.

Sys y Riquier (1981) realizaron una evaluación para cada unidad de suelos de acuerdo al Sistema FAO/UNESCO, por cultivo y nivel de inversión; calificando a los suelos S1 si no existe ninguna restricción, es decir, la clasificación agroclimática permanece; S2 si existe una restricción moderada, esto es, provoca que la clasificación agroclimática se degrade en una clase y N1 o N2 si no es

apta por el suelo para la producción de dicho cultivo (N1 no es apta actualmente y N2 permanentemente). En el cuadro 9.4 se muestran las clasificaciones de las unidades de suelos, para tres cultivos de Temporal en México (Flores, et al, citado por Ortiz).

Los mismos autores procedieron con las Fases calificando como 0 cuando no hay restricciones; -1 cuando se degrada una clase la clasificación agroclimática y N cuando no es apta para la producción del cultivo (N1 y N2). En el cuadro 9.5 se presentan las modificaciones por las fases.

En México, existe un mapa edafológico del Instituto de Estadística Geografía e Informática que puede usarse con este fin.

Modificaciones por textura

La metodología original indica que las texturas medias y finas (2 y 3 respectivamente) permanecen sin cambio y los suelos con textura gruesa (1) se degradan en una clase, excepto las unidades Qc, Al, Qf, Qa, Q, Tv, Po, Pl, Pf, ph, Pp, Pg, P y Fx las cuales permanecen sin cambio porque la limitación de texturas gruesas ya se han considerado en la calificación de la unidad de suelo.

Modificaciones por pendiente

Las pendientes óptimas y marginales para los cultivos estudiados se presentan en el cuadro 9.6. Las pendientes óptimas permanecen sin cambio y las marginales degradarían en una clase a la clasificación agroclimática.

En México no existen planos de Pendientes, sin embargo, un mapa que puede usarse como una alternativa es el fisiográfico del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, considerando como pendientes de 0-8% a las topoformas Valle, Planicie, Meseta y Llanura y de 8-30% a los Lomeríos.

Una consideración final es que se puede alterar el orden del análisis, después de la clasificación agroclimática se propone evaluar la pendiente para terminar con los suelos, como se muestra en las siguientes figuras para el Estado de México en relación a la producción de frijol con un nivel de inversión bajo.

Cuadro 9.1 Clasificación Agroclimática de Cultivos.
(Período de Crecimiento).

CULTIVO	DIVISION CLIMATICA	NIVEL DE INVERSION	CLASE DE APTITUD						
			NA	mA	A	MA	A	mA	NA
TRIGO DE	TROPICAL	ALTO	<105	105-119	120-149	150-209	210-254	255-269	>270
PRIMAVERA	TEMPLADA	BAJO	<105	105-119	120-149	150-224	225-269	270-284	>285
PAPA	TROPICAL	ALTO	<105	105-134	135-179	180-239	240-329	330-365	
	TEMPLADA	BAJO	<105	105-134	135-179	180-239	240-329	330-365	
CEBADA	TROPICAL	ALTO	< 85	85-104	105-149	150-209	210-269		
	TEMPLADA	BAJO	< 85	85-104	105-149	150-209	210-269		
CAÑA DE	TROPICAL	ALTO	<210	210-239	240-314	315-364	365		
AZUCAR	CALIENTE	BAJO	<210	210-239	240-314	315-364	365		
PLANTACIONES	TROPICAL	ALTO	<285	285-314	315-364	365			
DE PLATANO	CALIENTE	BAJO	<285	285-314	315-364	365			
YUCA	TROPICAL	ALTO	<150	150-179	180-224	225-329	330-364	365	
	CALIENTE	BAJO	<150	150-179	180-224	225-329	330-365		
SOYA	TROPICAL	ALTO	< 90	90-119	120-149	150-224	225-284	284-364	365
	CALIENTE	BAJO	< 90	90-119	120-149	150-194	195-284	284-329	>330
CAMOTE	TROPICAL	ALTO	<105	105-119	120-149	150-284	285-314	315-365	
	CALIENTE	BAJO	<105	105-119	120-149	150-239	240-364	365	
ALGODON	TROPICAL	ALTO	<120	120-134	135-149	150-209	210-254	255-330	>330
	CALIENTE	BAJO	<120	120-149	150-269			270-330	>330
MIJO	TROPICAL	ALTO		75-89	90-134	134-179	180-224	225-239	>239
	CALIENTE	BAJO		75-89	90-134	134-179	180-239	240-254	>254
PALMA DE	TROPICAL	ALTO	<250	250-284	285-347	348-365			
ACEITE	CALIENTE	BAJO	<250	250-284	285-347	348-365			

Cuadro 9.4 Calificaciones de las unidades de suelos por cultivos.

CULTIVO NIVEL DE - INVERSION	MAIZ		FRIJOL		SORGO		
	BAJO	ALTO	BAJO	ALTO	BAJO	ALTO	
J	VEASE SECCION 4.8						
G	Ga	M2	M1/M2	M2	M1/M2	M2	M1/M2
	Gb	M2	M1/M2	M2	M1/M2	M2	M1/M2
	Gc	M2	M1/M2	M2	M1/M2	M2	M1/M2
	Gd	M2	M1/M2	M2	M1/M2	M2	M1/M2
	Ge	M2	M2	M2	M2	M2	M2
H	M2/M2	M2/M2	M2/M2	M2/M2	M2	M2	
I	Ia	M2	M2	M2	M2	M2	M1/M2
	Ib	M2	M2	M2	M2	M2	M2
J	Ja	M2	M2	M2	M2	M2	M2/M2
	Jb	M2	M2	M2	M2	M2	M1/M2
K	Ka	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	Kb	S1/S2	S1/S2	S1/S2	S1/S2	S1	S1
	Kc	S1	S1	S1	S1	S1	S1
L	La	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	Lb	S2	S2	S2	S2	S1	S1
M	Ma	S1/S2	S1/S2	S1/S2	S1/S2	S1/S2	S1/S2
	Mb	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	Mc	S1/S2	S1	S1/S2	S1	S2	S1
	Md	S1/S2	S1	S1/S2	S1	S2	S1
	Me	S1/S2	S1	S1/S2	S1	S2	S1
N	Na	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	Nb	S1	S1	S1	S1	S1	S1
	Nc	S1/S2	S1	S1/S2	S1	S2	S1
	Nd	S2	S1/S2	S2	S1/S2	S2	S1/S2
	Ne	S2/M2	S2/M2	S2/M2	S2/M2	S2/M2	S2/M2
O	Oa	S2	S1/M2	S2	S1/M2	S2	S1/M2
	Ob	S2	S1/M2	S2	S1/M2	S2	S1/M2
	Oc	S2	S1/M2	S2	S1/M2	S2	S1/M2
	Od	S2	S1/M2	S2	S1/M2	S2	S1/M2
	Oe	S2	S1/M2	S2	S1/M2	S2	S1/M2
P	Pa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Pb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Pc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Pd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Pe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
Q	Qa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Qb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Qc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Qd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Qe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
R	Ra	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Rb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Rc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Rd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Re	S2	S1	S2	S1	S1	S1
S	Sa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Sb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Sc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Sd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Se	S2	S1	S2	S1	S1	S1
T	Ta	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Tb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Tc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Td	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Te	S2	S1	S2	S1	S1	S1
U	Ua	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Ub	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Uc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Ud	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Ue	S2	S1	S2	S1	S1	S1
V	Va	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Vb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Vc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Vd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Ve	S2	S1	S2	S1	S1	S1
W	Wa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Wb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Wc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Wd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	We	S2	S1	S2	S1	S1	S1
X	Xa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Xb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Xc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Xd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Xe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
Y	Ya	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Yb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Yc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Yd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Ye	S2	S1	S2	S1	S1	S1
Z	Za	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Zb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Zc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Zd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	Ze	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AA	AAa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AAb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AAc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AAd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AAe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AB	ABa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ABb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ABc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ABd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ABe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AC	ACa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ACb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ACc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ACd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ACe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AD	ADa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ADb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ADc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ADd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ADe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AE	AEa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AEb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AEc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AEd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AEe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AF	AFa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AFb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AFc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AFd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AFe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AG	AGa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AGb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AGc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AGd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AGe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AH	AHa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AHb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AHc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AHd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AHe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AI	AIa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AIb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AIc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AId	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AIe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AJ	AJa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AJb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AJc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AJd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AJe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AK	AKa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AKb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AKc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AKd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AKe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AL	ALa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ALb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ALc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ALd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ALe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AM	AMa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AMb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AMc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AMd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AMe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AN	ANa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ANb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ANc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ANd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	ANe	S2	S1	S2	S1	S1	S1
AO	AOa	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AOb	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AOc	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AOd	S2	S1	S2	S1	S1	S1
	AOe	S2	S1	S2	S1	S1	S1

Cuadro 9.5 Modificaciones por Fases.

CULTIVO	FASE	PEDREGOSA	LITICA	PETRICA	PETRO CALCICA	PETRO GIPSICA	PETRO FERRICA	FREATICA	FRAGIPAN	DURIPAN	SALINA	SODICA
		BAJO	-1	-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0	0/-1	0/-1	-1/N2
ALTO	N2	N2	0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	-1/N1	0/-1	
SORGO	BAJO	-1	-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0	0/-1	0/-1	-1/N2	0/-1
	ALTO	N2	N2	0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	-1/N1	0/-1
MIJO	BAJO	-1	-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0	0/-1	0/-1	-1/N2	0
	ALTO	N2	N2	0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	-1/N1	0/-1
FRIJOL	BAJO	-1	-1	0/-1	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	N2	N2	0/-1	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
MAIZ	BAJO	-1	-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0	0/-1	0/-1	-1/N2	0/-1
	ALTO	N2	N2	0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	-1/N1	0/-1
SOYA	BAJO	-1	-1	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	N2	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
ALGODON	BAJO	-1	-1	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	0/-1	0/-1
	ALTO	N2	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	0/-1	0/-1
PAPA	BAJO	-1	-1	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	N2	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
CAYOTE	BAJO	-1	-1	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	N2	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
CARA DE AZUCAR	BAJO	-1	-1	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	-1/N2	N2
	ALTO	N2	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	-1/N1	N2
YUCA	BAJO	N2	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	N2	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
ARROZ (Inund.)	BAJO	N2	N2	-1/N2	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	0/-1
	ALTO	N2	N2	-1/N2	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	0/-1
PLATANO PLANTACION	BAJO	-1	N2	0/-1	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	-1	N2	0/-1	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N2
CACAHUATE	BAJO	-1	-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	N2	N2	0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N2	N1/N2
CEBADA	BAJO	-1	-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0/-1
	ALTO	N2	N2	0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	0/-1	0/-1
PALMA DE ACEITE	BAJO	-1	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	-1/N2	N2	N2
	ALTO	-1	N2	-1/0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	-1/N2	N2	N2
ARROZ	BAJO	-1	-1	0	0/-1	0/-1	0/-1	0	0/-1	0/-1	N2	N2
	ALTO	N2	N2	0	-1/N2	-1/N2	-1/N2	0	0/-1	0/-1	N1/N2	N1/N2

Cuadro 9.6. Pendientes Optimas y Marginales por cultivo y nivel de Inversión (Sys y Riquier, 1980).

CULTIVO	PENDIENTE (%)			
	INVERSION ALTA		INVERSION BAJA	
	OPTIMA	MARGINAL	OPTIMA	MARGINAL
TRIGO	0-8	8-16	0-8	8-24
SORGO	0-8	8-16	0-8	8-20
FRIJOL	0-8	8-16	0-8	8-20
MAIZ	0-8	8-16	0-8	8-20
SOYA	0-8	8-16	0-8	8-20
ALGODON	0-8	8-16	0-8	8-20
PAPA	0-8	8-16	0-8	8-20
CAMOTE	0-8	8-16	0-8	8-20
CAÑA DE AZUCAR	0-8	8-16	0-8	8-24
YUCA	0-8	8-16	0-4	4-16
ARROZ (INUND.)	0-4	4-8	0-4	4-8
PLATANO	0-16	16-30	0-16	16-50
CACAHUATE	0-8	8-16	0-8	8-20
CEBADA	0-8	8-16	0-8	8-24
PALMA DE ACEITE	0-16	16-30	0-16	16-50
ARROZ (S/INUND.)	0-8	8-16	0-8	8-24
MIJO	0-8	8-16	0-8	8-24

CONCLUSIONES

La base principal de la agroclimatología, es la conceptualización del área de estudio del clima y del tiempo, ya que ellos son la base de estudio para ésta ciencia.

De las características principales que se desprenden en éste estudio, es que la meteorología es involucrada constantemente en el análisis climático, ya que ésta ciencia se basa en el estudio del tiempo atmosférico, y recurre a observaciones de series prefijadas de un día, de un mes, de un trimestre, de un año, y la climatología no, ya que para lograr su objetivo debe basarse en observaciones hechas regularmente durante un mínimo de 30 años, cabe aclarar que hay estudios climatológicos para períodos menores que el mínimo convencional.

En conclusión, la climatología estudia el clima, es descriptiva, no estudia las causas que lo originan, no tiene fechas pero sí período de años.

La meteorología tiene fecha, es descriptiva, no estudia causas. Es el estudio de la distribución de las plantas y animales de acuerdo a los diferentes climas. También describe las tendencias de crecimiento y reproducción de los seres vivos en función del clima. Es en consecuencia adaptación, o sea, ecología climática. Para esto se deben estudiar, para el mismo período, los valores promedio tanto del crecimiento y producción de los vegetales o animales con los del clima.

La agrometeorología si estudia las causas y comprende el estudio de las reacciones y comportamientos de los seres vivos ante la manifestación continua de los elementos del tiempo. Aquí no se analizan valores promedio sino valores reales de un solo momento (ciclo vegetativo, por ejemplo).

Es clara la diferencia entre ambas disciplinas, pero también es claro que la agroclimatología surge de los análisis estadísticos de los datos agrometeorológicos, es decir, que sin el término agrometeorología se pueden englobar ambas disciplinas siempre y cuando se tenga presente lo anterior.

Es necesario establecer una delimitación entre la agroclimatología y la agrometeorología, ya que llegan en algunas ocasiones a confundirse .

Mientras no se desarrolle la agroclimatología como una ciencia importante en el país, la producción agrícola

seguirá siendo una explotación empírica, aun cuando está industrializada.

En cuanto a los principios que rigen la distribución de los organismos y a pesar que se considera conveniente, hay que aclarar que además de los elementos del clima, también se incluyen dentro de él, los minerales, el suelo, etc. y asimismo, se debe recordar que todas estas fases del medio están íntima y constantemente interrelacionadas, en forma compleja; por ejemplo, la forma en que las hojas de un cultivo responden a la luz, puede depender de la disponibilidad de agua en el suelo.

La geografía mantiene una relación directa con la agricultura como actividad humana y económica, cuya expresión se manifiesta en la habilitación del espacio al que se aplican técnicas y tiempo de trabajo, y este aspecto es la función principal de la agroclimatología.

De los razonamientos de **Palacio y Gómez (1989)**, cabe resaltar que en los estudios agroclimáticos confluyen varias ciencias como la agronomía, la geografía y la biología a diferentes niveles, además que la agroclimatología ha construido su propio marco teórico-conceptual, es así como la geografía y la agroclimatología coinciden en su posición transdisciplinaria.

En cuanto al capítulo dos es evidente que no existe una clasificación única que pueda ser utilizada de manera satisfactoria para más de un número limitado de fines, por lo que se han desarrollado varios esquemas distintos.

Algunos autores proporcionan un sistema adecuado de nomenclatura, mientras que otros constituyen los preliminares necesarios para un estudio posterior. Así por ejemplo existen diversas clasificaciones climáticas de las relaciones entre el clima y la vegetación o el suelo, pero son escasos los intentos realizados para basar una clasificación sobre los efectos directos del clima en el hombre.

De las clasificaciones climáticas destacan la clasificación de Köppen y Thornthwaite, son de las más conocidas y utilizadas. Los demás índices son poco usados.

Las clasificaciones de Thornthwaite son útiles para plantaciones y actividades agrícolas.

El que destaca es el de Zonas de Vida, éste sistema presenta las siguientes ventajas:

a) emplea elementos climáticos que pueden ser fácilmente obtenidos en la mayoría de las estaciones meteorológicas.

b) utiliza la biotemperatura y la progresión logarítmica de la precipitación.

c) se da una relación muy alta entre las zonas de vida y la vegetación existente y entre las prácticas agronómicas y el uso de la tierra.

d) Después de conocer el sistema es fácil reconocer en el campo las zonas de vida y sus límites a partir de la fisonomía de la vegetación, sin necesidad de utilizar los datos climáticos,

e) puede ser aplicado en la clasificación detallada de una región.

No obstante las ventajas señaladas, en el mundo se presentan localmente otros grupos de condiciones que no pueden ser representados en el diagrama, lo cual constituye una limitante de este sistema de clasificación. Además de que solo sirve en el trópico.

Las clasificaciones agroclimáticas son las adecuadas ya que involucran el análisis de información del clima en combinación con información de cultivos. Es conveniente considerar las sugerencias de Villalpando (1984).

Las clasificaciones agroclimáticas, no solo sirven para zonificar cultivos de acuerdo a su potencial, son también un marco de referencia agroclimático para el planteamiento de actividades operativas en la planificación regional agropecuaria y forestal.

Las representaciones gráficas de la información climatológica son excelentes auxiliares en los estudios y en los análisis agroclimáticos, ya que la mayoría de las veces son el marco de referencia del sitio de estudio, o bien pueden llegar a ser el punto de partida para la organización operativa de un proyecto.

De las representaciones gráficas el mejor es el sistema modificado por E. García, ya que llega a considerar dos períodos de lluvia (de verano e invernal).

Las prácticas agrometeorológicas llevadas adecuadamente son una fuente de información valiosa para los estudios agroclimáticos.

Estas observaciones deben efectuarse de una manera tal, que constituyan una medida cualitativa y en algunos casos cuantitativa, de las reacciones de la planta y del animal, a las condiciones del ambiente.

Los parámetros que determina la Organización Meteorológica Mundial para la investigación agrometeorológica y agroclimática, en su mayoría no son determinados por las estaciones climáticas del país. Debido a la gran deficiencia que se tiene en cuanto a la estandarización y recopilación de los datos atmosféricos, se han tenido que derivar formulas empíricas para resolver esta problemática.

A pesar de estos esfuerzos, los progresos en materia de investigación agrometeorológica y de servicios agrometeorológicos se ven con frecuencia dificultados por la falta de personal debidamente instruido a todos los niveles.

Este problema es especialmente grave en los países en desarrollo en los que el progreso económico y el nivel de la producción alimentaria dependen en gran medida de la evaluación de sus recursos climáticos, mediante encuestas agroclimáticas, y también de la creación de servicios que lleguen hasta las mismas explotaciones agropecuarias y forestales.

La radiación solar es la fuente de vida del planeta tierra, en el capítulo correspondiente se ha visto la importancia de ella en los procesos físicos de la atmósfera, en las manifestaciones climáticas, en los procesos biológicos que ocurren en la naturaleza, en el crecimiento y desarrollo de la vegetación.

El problema al que nos enfrentamos aquí es a la carencia de información, y a la carencia de equipo que estime este parámetro. La mayoría de las estaciones meteorológicas y climatológicas de México carecen de heliografo, instrumento que en determinado momento nos permite estimar la radiación solar en calorías/cm/día a partir de los datos de insolación, y por otro lado las estimaciones que hacen los observadores de cielo cubierto también nos permite estimarlo a partir de la nubosidad utilizando formulas empíricas. La irregularidad en el funcionamiento de éstas estaciones y la disposición de la información en el momento oportuno, ha obligado a que se carezca de los estudios adecuados.

Las clasificaciones que se hacen al respecto de la respuesta de las plantas a la duración del día es muy general. En realidad existen muchos otros tipos de respuesta. Por ejemplo, hay plantas que no florecen si los días son muy cortos o si son muy largos, requieren días intermedios, otras requieren un período de días largos seguido de uno de días cortos. En si es una serie de combinaciones que deben ser evaluadas para optimizar la producción agrícola.

La temperatura es el segundo elemento a conocer y evaluar en todos y cada uno de los procesos que intervienen en el desarrollo y crecimiento de los organismos vivos.

Como se indico anteriormente las variaciones de la temperatura influyen en varios procesos de la vida, provocando un nulo desarrollo o el óptimo de este.

Ante el desconocimiento de los requerimientos térmicos de las plantas para su crecimiento y desarrollo, se han desarrollado fórmulas empíricas, que han permitido tener estimaciones acerca de este parámetro.

De las anteriormente ejemplificadas, el método termofisiológico es el más adecuado, ya que considera para la estimación de la constante térmica, la respuesta de las plantas a la temperatura, el problema es que se requiere contar con información meticulosamente obtenida y bajo condiciones muy controladas, tanto en cámaras de crecimiento como bajo condiciones de campo, lo que implica en determinado momento un alto costo de inversión en un estudio de este tipo.

Los métodos exponencial, fisiológico y residual, presentan las siguientes deficiencias en general:

1. Se toma una sola temperatura base o cero vital sin tomar en cuenta que éstas varía con la especie y con las etapas fenológicas.
2. Se toma una respuesta lineal de las plantas a la temperatura dando con ello un mayor peso a las temperaturas elevadas.
3. Se asume que las temperaturas diurnas y nocturnas tienen la misma importancia para el crecimiento de las plantas.
4. No se distingue la diferencia entre periodos calurosos y fríos, y la situación inversa.
5. No toma en cuenta que las variaciones diarias de la temperatura son como frecuencias más importantes que el valor de la temperatura media diaria.

De lo anterior se desprende que los mejores métodos son el de los triángulos y de los trapecios, ya que considera a los termogramas. La deficiencia es que no siempre están disponibles.

El método de Thom es el más aproximado en la obtención de la constante térmica.

En cuanto a la estimación de las unidades fototérmicas la aproximación de ella dependera del método usado para la estimación de las unidades calor.

La utilidad de estas metodologías es amplia, y se utiliza en la zonificación de cultivos, ya que a través del análisis de la información se deduce el lugar potencial para el establecimiento de la vegetación más adecuada.

Para la estimación de las horas frío el método del huerto fenológico es el más adecuados, el costo económico y la superficie que requiere, son las limitantes principales.

La carencia de información ha obligado a la formulación de métodos indirectos, los cuales han sido probados ampliamente, la recomendación al respecto es que sean utilizados con la debida reserva, ya que la mayoría de ellos han sido elaborados en lugares que no corresponden a la situación geográfica de México.

El método de Gómez-Morales, considero este aspecto, además que lo comparo contra los ya conocidos, y los resultados obtenidos arrojaron un menor porcentaje de error respecto al termógrafo, éste es el método a seguir si se requiere de precisión en la estimación de horas frío.

El cálculo de la precipitación, al igual que la temperatura, presenta la problemática de la escasez de la información, la estimación de este parámetro requiere de mayor cantidad de información, continua y constante por lo menos de 30 años, para que sea confiable el análisis que de aquí se derive.

En la estimación de las probabilidades de lluvia, es necesario realizar previamente una visita a la estación meteorológica y/o climatológica, para poder establecer un criterio en cuanto a la veracidad de la información, conocer incluso al observador, ver el manejo de la información, la ubicación geográfica de la estación, verificar la calibración de los instrumentos, conocer las actividades económicas que se realizan en la región circundante, todo ello con la finalidad de saber si en determinado momento los datos pueden ser confiables o no.

Todas las estimaciones de la probabilidad de lluvia requieren periodos continuos de información, si existen lapsos es necesario subsanar ésta situación, y aun así se llegan a presentar oscilaciones significativas.

La estimación de probabilidad de lluvia, se puede realizar para diversos periodos de acuerdo a los fines y objetivos que se marquen.

La evaporación, al igual que la precipitación, forman parte de un ciclo hidrológico, y a su vez, ambos llegan a conformar el balance hídrico del suelo.

El dato de evaporación por sí solo, no es indicativo de las condiciones hídricas de una superficie. A fin de dar una idea aproximada de las cantidades de agua que se evapora y transpiran las plantas, animales y el mismo hombre, se han formulado coeficientes para relacionar la evapotranspiración potencial con la evapotranspiración máxima.

Las formulas para el cálculo de la evapotranspiración potencial, requieren de mucha información climática, como también información de la planta. Hay fórmulas muy elaboradas que requieren información precisa y con rangos de 12 horas (día y noche), como es el caso de la fórmula de Penman.

Para estimar este parámetro se recomienda los métodos que requieran variables fáciles de obtener, como son la temperatura y la evaporación del tanque tipo A, en virtud de la dificultad de obtener la información de la velocidad del viento, radiación global, humedad relativa, etc. Además de que es riesgoso utilizar un método que fue obtenido en una región geográfica distinta a el lugar en el cual se desea aplicar.

Los riesgos meteorológicos para la vegetación como son las granizadas, las heladas, vientos fuertes, rocío y nieblas, no son considerados índices agroclimáticos, ya que estos no se derivan del clima, sino del tiempo atmosférico.

No existen tecnologías seguras par la prevención de los riesgos meteorológicos, y como es el caso de la prevención de la heladas, implica gastos fuertes y la utilización de tecnología sofisticada. Y aún así en ocasiones no es suficiente.

Es así como se estiman niveles de probabilidad de ocurrencia, con el fin de establecer periodos y zonas de riesgo, que se puedan verse afectadas en determinado momento, y que repercute en las actividades agropecuarias y forestales de la región .

Para la estimación de estos parámetros, la limitante es la carencia de la información meteorológica. No solo en cantidad, sino también en distribución horizontal de las estaciones observadoras, el problema es que muchas de las estaciones no son representativas de las condiciones imperantes, ya sea por su ubicación, instalación y manejo, la información es escasa y errónea .

Las metodologías presentadas son aceptables, y se puede lograr una excelente zonificación de las zonas de riesgo y de las zonas libres de ellos.

Se carece de los datos del viento estimados con instrumentos y equipo calibrado. La intensidad y dirección del viento, son datos valiosos y que de contar con ellos, nos permitirán deducir los factores limitantes, y a su vez apoyaran estudios de mayor precisión y veracidad. Por lo que es indispensable dotar de equipo a la brevedad posible a las estaciones tradicionales.

La política que ha seguido el SMN, con el establecimiento de estaciones automáticas en sitios privilegiados, limita el campo de acción de la agroclimatología, además de que el número y la distribución de ellas es insuficiente para cubrir el mosaico de condiciones climáticas de México.

La metodología propuesta por la FAO, utilizada con honestidad y datos confiables es excelente para lograr una zonificación agroecológica de nuestro país. El universo de alternativas enriquecerá el área de estudio de la agroclimatología. Las actividades operativas y de planeación podrán ser las óptimas, las actividades agropecuarias y forestales serán potencialmente rentables, cuyos beneficios redundaran en la economía nacional.

LITERATURA CITADA

AGUILERA C. Y MARTINEZ E. 1980. Relaciones, Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Departamento de Irrigación. Chapingo, México, Universidad Autónoma de Chapingo.

BACSO NANDOR, 1967. Agrometeorología, Instituto del Libro, La Habana, Cuba.

BARRY, ROGER G., y Chorley, Richard J. Atmósfera, tiempo y clima. Segunda Edición. Editorial Omega. Barcelona, España.

BRASIL MINISTERIO DE EDUCACION Y CULTURA, 1970. Manual de Instrucciones, Instituto de Física y Matemáticas. Pelotas, RS. Brasil, Universidad Nacional de Pelotas.

CUBA, ACADEMIA DE CIENCIAS. 1976. Instrucciones para realizar observaciones Agrometeorológicas en Estaciones y Puestos, Instituto de Meteorología. Casa Blanca, La Habana, Academia de Ciencias de Cuba.

CHACON ZUNIGA, ABIGAIL. 1985. Agroclimatología. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.

CHIRKOV, Y.I. 1979. Agroclimatology. En agroclimatology. pág. 317-321. Springer-Verlag. Berlín. Alemania.

D.D.F. Y COLEGIO DE MEXICO. 1987. Atlas de la Ciudad de México, Distrito Federal, México.

DE FINA, A.L. Y A. RAVELO. 1973. Climatología y Fenología Agrícolas. Editor. Universidad de Buenos Aires, Argentina.

DIAZ M., DANIEL H. 1987. Requerimiento de frío en frutales caducifolios. Tema Didáctico Núm. 2, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. SARH. México, D.F.

DISTRITOS Y UNIDADES DE TEMPORAL. 1980. Zonificación Fenoclimática. Diversas Publicaciones para los estados de la República Mexicana.

EIMERN, J.V. Y HAECKEL, H. WETTER - und Klima Kunde; Fin Lenrbuch der Agrarmeteorologie. Stuttgart, Ulmer, 1984, 275 pág.

ESPINOSA CARDENAS MOISES. 1994. Bioclimatología Urbana de la Ciudad de México. Tesis de Licenciatura, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D.F.

E.E.U.U. GEOPHYSICAL INSTRUMENTS AND SYSTEMS. 1984. Catalog 1984-1985, Sacramento, California, Weather Measure Weathertronic, Division of Qualimetrics, Inc.

F.A.O. 1978 Agro-ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and Results for Africa. World Soil Resources Report, Rome.

_____. 1981. Agroecological Zones Project. Vol. III. Methodology and Results for México, Central and South América. Rome.

FLORES V., J.A. 1991. Importancia de una Red Agroclimática Nacional. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística y Sociedad Mexicana de Agroclimatología, A.C. Boletín CLI, México, D.F.

GARCIA-BENAVIDES, J., 1975. Zonificación Ecológica de Cultivos. Agronomía Tropical, Venezuela, XXV (5).

_____, 1979. Estructura Metodológica para la Caracterización Agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Tesis Doctor en Ciencias, Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Edo. de México. México.

GARCIA E., R. VIDAL, L. TAMAYO, T. REYNA, R. SANCHEZ, M. SOTO. 1973. Precipitación y Probabilidad de lluvia en la República Mexicana y su evaluación. C.E.T.E.N.A.L. Instituto de Geografía. UNAM. Distrito Federal, México.

GARCIA DE MIRANDA, ENRIQUETA. 1978. Apuntes de Climatología, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F.

_____. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. México.

GERENCIA DEL SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL. 1994. Normales Climatológicas. Período 1941-1980. Comisión Nacional del Agua, México, D.F. (Inédito).

_____. Base de Datos del Sistema CLICOM. Comisión Nacional del Agua, México, D.F. (Inédito).

GOMEZ MORALES, BENJAMIN Y ARTEAGA RAMIREZ, RAMON. 1987. Elementos Básicos para el manejo de Instrumental Meteorológico. Compañía Editorial Continental (CECSA). México, D.F.

GOMEZ ROJAS, J.C. 1981. Método Climático de Fina en la Aplicación de la Agricultura en el Estado de Aguascalientes. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

_____. 1985. Memorias del Medio Ambiente y Agricultura I, Reunión Nacional de Agroclimatología. Departamento de Geografía. DEP, Facultad de Filosofía y Letras. UNAM, México, D.F.

_____. 1986. Características climáticas de las regiones agrícolas de México. México, D.F. S.E.

_____. 1989. Teoría y práctica en la Aplicación de Métodos de Cálculo de horas-frío en el Centro de México. Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

_____. 1991. Agroclimatología y espacio geográfico en el noreste del estado de Morelos. Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística. Boletín CXLVII, México.

GUZMAN G. 1980. Requerimientos de datos y metodología para una zonificación agroclimática del maíz. División de Meteorología e Hidrología. El Salvador, C.A.

GRASSI, C.B.A. 1983. Riego de Primeras y Ultimas Heladas en Puebla y Tlaxcala, respecto a cultivos Básicos. Tesis de M.C., C. Postgraduados, Chapingo, México.

HERRERA VAZQUEZ, GLORIA. 1991. Estudio Agroclimático del Municipio de Maravatio Michoacán. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias. UNAM. México, D.F.

I.C.R.I.S.A.T. 1980. Climatic Classification. A consultants meeting, 14-16 Abril, India.

I.N.I.A. 1984. Proyecto Caracterización Agroclimática del Area de Influencia de los Campos Agrícolas Experimentales de la Zona Centro. Mimeografiado. Campo Agrícola Experimental, Zapopan, Jalisco, México.

I.N.I.F.A.P. 1988. Primera Reunión Científica Forestal y Agropecuaria. Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Puebla. Puebla, México.

_____. 1990. Segunda Reunión Científica Forestal y Agropecuaria. Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias del Distrito Federal. México, D.F.

_____. 1992. Reunión Científica Forestal y Agropecuaria. Centro de Investigación de la Reunión Centro. Campo Experimental Coyoacán, México, D.F.

JOCHEN H, et al , 1986. Agroclimatología Tropical. Editor. Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica.

LOPEZ-LUGO F. 1980. Evaluación de cinco métodos de estratificación del ambiente. Tesis M.C. Rama de Suelos, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Edo. de México. México.

MOLINA GALAN, JOSE. 1983. Recursos agrícolas de zonas áridas y semiáridas de México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Edo. de México, México.

MORENO SANCHEZ, R. et al. 1993. Agenda Ejecutiva del Potencial Productivo Vegetal, para los 32 estados de la República Mexicana. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. (SARH). México.

ORTIZ SOLORIO, CARLOS A. 1982. Apuntes del curso de Agrometeorología. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Edo. de México, México.

_____. 1984. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa. Departamento de Suelos. U.A.CH., Chapingo, Edo. de México, México.

_____. Y PAJARO HUERTAS D. 1985. Elaboración de Inventarios Climáticos a partir de Datos Escasos, Caso de México. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

_____; OJEDA TREJO, E. Y PAJARO HUERTAS, D. 1987. Manual de la Metodología de Zonas Agroecológicas. Curso-Taller. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. México (Inédito).

_____. 1988. Estimación de Rendimientos Máximos de Cultivos por el Método de Zonas Agroecológicas. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. México (Inédito).

O.M.M. 1982. Guía de Prácticas Agrometeorológicas. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza.

_____. 1983. Apuntes del IV Curso Internacional para la Formación de Técnicos en Agrometeorología. Bogotá, Colombia.

_____. 1988. La Climatología urbana y sus aplicaciones con especial referencia a las regiones tropicales. Documentos de la Conferencia Técnica. OMM-N°652. México, D.F., 26 al 30 de noviembre de 1984, Ginebra, Suiza.

O.M.M.A.C. 1991. Memoria del quinto Congreso Nacional de Meteorología. Organización Mexicana de Meteorólogos A.C., Escuela Superior de Agricultura "Hermanos Escobar". México.

PAJARO HUERTAS, D. Y ORTIZ SOLORIO, C.A. 1989. Estimación del Período libre de Heladas para la República Mexicana. Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo, Edo. de México, México.

_____ 1989. Estimación del Período de Crecimiento por Disponibilidad de Agua y Libre de Heladas para la República Mexicana. Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología.

PALACIO A, A. G Y GOMEZ R, J.C. 1989. Perspectiva Geográfica de la Agroclimatología. Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma de Chapingo, México.

R.G. BARRY-R.J. CHORLEY. 1978. Atmósfera, Tiempo y Clima. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España.

ROMO GONZALEZ, J.R. Y ARTEAGA RAMIREZ, R. 1983. Meteorología Agrícola. Departamento de Irrigación U.A.CH., Chapingo, Edo. de México, México.

RUIZ CORRAL, J. A. Y SERNA PEREZ, A. 1989. Determinación de Temperaturas nocturnas que predicen la ocurrencia de una helada. Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma de Chapingo, Edo. de México. México.

RUIZ HERNANDEZ, J. A. 1994. Cambios Climáticos en la Ciudad de México. Tesis de Licenciatura, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.

S.A.R.H. 1984. Términos de Referencia y Especificaciones para estudios agroclimatológicos. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Dirección General de Estudios. Subdirección de Planeación. México.

_____. Curso de Capacitación en Agroclimatología. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Estudios. Subdirección de Hidrología. México.

SHAW, R.N. 1977. Climate Requirement. En G.F. Sprage, Edit. Corn and Corn Improvement, pág. 591-623, A.S.A.

S.M.A.A.C. 1985. Memorias de la Primer Reunión Nacional de Agroclimatología. Sociedad Mexicana de Agroclimatología, A.C. Universidad Nacional Autónoma de México. Depto de Geografía. División de Estudios de Posgrado, Facultad de Filosofía y Letras, México.

_____ 1989. Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología. Sociedad Mexicana de Agroclimatología A.C.

Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación, Chapingo, Edo. de México, México.

SOCIEDAD MEXICANA DE GEOGRAFIA Y ESTADISTICA Y SOCIEDAD MEXICANA DE AGROCLIMATOLOGIA. 1991. Climatología Aplicada. Boletín CLI. México.

S.P.P. SINTESIS GEOGRAFICA DE DIVERSOS ESTADOS. COORDINACION.

TOHARIA CORTES, MANUEL. 1984. Tiempo y Clima, Colección SALVAT, Temas Clave No. 14, SALVAT Editores, S.A. Navarra, España.

TORREZ RUIZ, EDMUNDO, 1983. Agrometeorología, Editorial Diana, México, D.F.

TURRENT FERNANDEZ, A. 1981, Estimación del Rendimiento Productivo Actual de Maíz y de Frijol en la República Mexicana. INIA-C.P.CHAPINGO, Oficina de Asesores de la Presidencia de la República Mexicana.

VAZQUEZ PEÑA, M. Y ARTEAGA RAMIREZ, R. 1989. Programa para calcular probabilidad de heladas en base a tres criterios. Memorias de la Segunda Reunión Nacional de Agroclimatología.

VIDAL, Z. R. 1980. Algunas Relaciones Clima-Cultivo en el Estado de Morelos. Instituto de Geografía. UNAM. México.

VILLALPANDO IBARRA J. FRANCISCO. 1984, Metodología de Investigación en Agroclimatología, Curso de Ordenación para aspirantes a investigadores del INIFAP, Tronco Común, SARH, INIFAP, México.

A

N

E

X

O

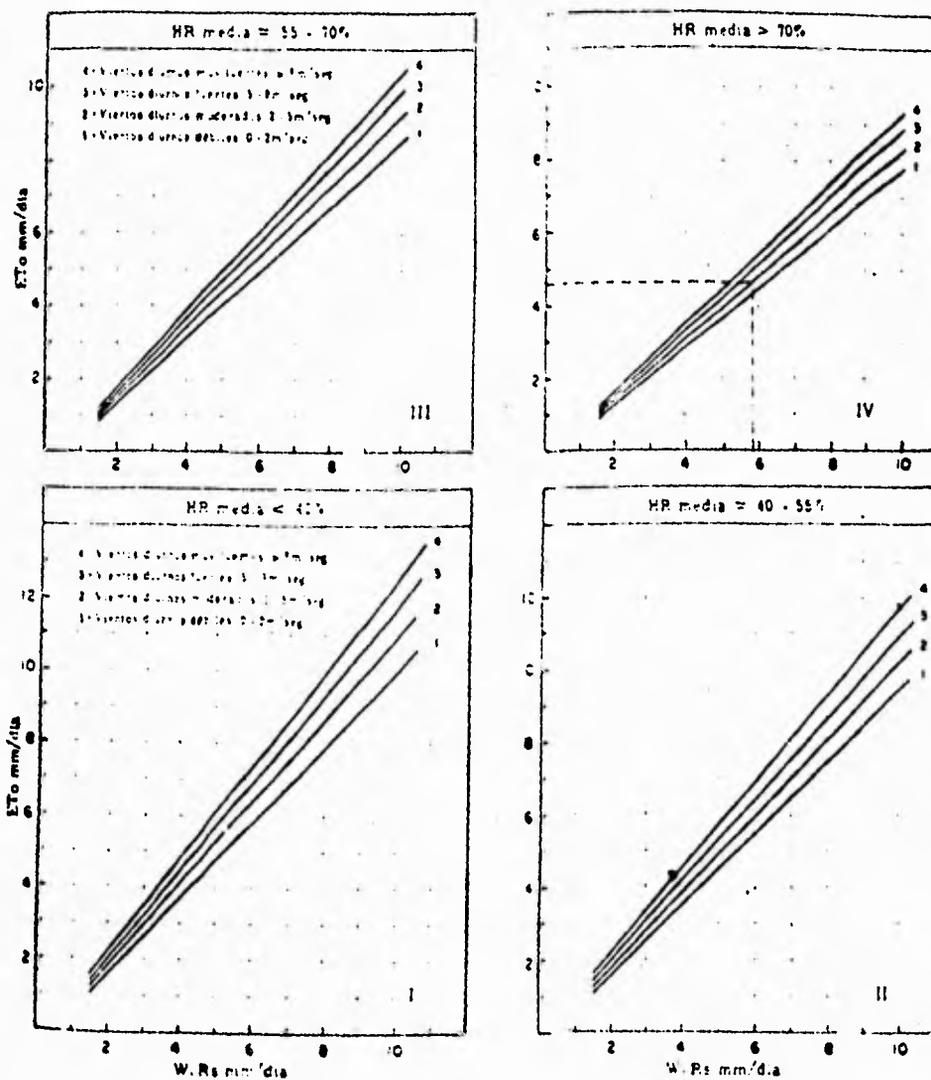


Fig. 1A. Relación para obtener la ET0 a partir de valores calculados de W.Rs y un conocimiento general de la humedad relativa media y de los vientos diarios.

FALLA DE ORIGEN

Tabla 2A. Tabla de Horas Frio Calculadas con el Método de Da Mota.
(Tabla preparada por Ing. Ignacio del Real L. INIA, 1982)

T°C	H.F	T°C	H.F	T°C	H.F	T°C	H.F
17.1	-2.59	14.4	74.41	11.7	151.42	9.0	228.42
17.0	0.26	14.3	77.26	11.6	154.27	8.9	231.27
16.9	3.11	14.2	80.12	11.5	157.12	8.8	234.12
16.8	5.96	14.1	82.97	11.4	159.97	8.7	236.98
16.7	8.81	14.0	85.82	11.3	162.82	8.6	239.83
16.6	11.67	13.9	88.67	11.2	165.68	8.5	242.68
16.5	14.52	13.8	91.52	11.1	168.53	8.4	245.53
16.4	17.37	13.7	94.38	11.0	171.38	8.3	248.38
16.3	20.22	13.6	97.23	10.9	174.23	8.2	251.24
16.2	23.08	13.5	100.08	10.8	177.08	8.1	254.09
16.1	25.93	13.4	102.93	10.7	179.94	8.0	256.67
16.0	28.78	13.3	105.78	10.6	182.79	7.9	259.25
15.9	31.63	13.2	108.64	10.5	185.64	7.8	261.84
15.8	34.48	13.1	111.49	10.4	188.49	7.7	264.42
15.7	37.34	13.0	114.34	10.3	191.34	7.6	267.00
15.6	40.19	12.9	117.19	10.2	194.20	7.5	269.58
15.5	43.04	12.8	120.04	10.1	197.05	7.4	272.16
15.4	45.89	12.7	122.90	10.0	199.90	7.3	274.75
15.3	48.74	12.6	125.75	9.9	202.75	7.2	277.33
15.2	51.60	12.5	128.60	9.8	205.60	7.1	279.91
15.1	54.45	12.4	131.45	9.7	208.46	7.0	285.46
15.0	57.30	12.3	134.30	9.6	111.31	6.9	288.31
14.9	60.15	12.2	137.16	9.5	214.16	6.8	291.16
14.8	63.00	12.1	140.01	9.4	217.01	6.7	294.02
14.7	65.86	12.0	142.86	9.3	219.86	6.6	296.87
14.6	68.71	11.9	145.71	9.2	222.72	6.5	299.72
14.5	71.56	11.8	148.56	9.1	225.57	6.4	302.57

Tabla 3A. Tabla de Weinberger para el Cálculo de las Horas Frío
Promedios Interpolados

Nº horas frío	Prom. °C dic-ene						
50	17.1	370	13.9	690	11.1	1010	8.6
60	17.0	380	13.8	700	11.0	1020	8.5
70	16.9	390	13.7	710	10.9	1030	8.4
80	16.8	400	13.6	720	10.9	1040	8.4
90	16.7	410	13.5	730	10.8	1050	8.3
100	16.6	420	13.4	740	10.7	1060	8.2
110	16.5	430	13.3	750	10.6	1070	8.2
120	16.4	440	13.2	760	10.5	1080	8.1
130	16.3	450	13.1	770	10.4	1090	8.0
140	16.2	460	13.0	780	10.4	1100	8.0
150	16.1	470	12.9	790	10.3	1110	7.9
160	16.0	480	12.9	800	10.2	1120	7.8
170	15.9	490	12.8	810	10.1	1130	7.7
180	15.8	500	12.7	820	10.0	1140	7.7
190	15.7	510	12.6	830	10.0	1150	7.6
200	15.6	520	12.6	840	9.9	1160	7.5
210	15.5	530	12.4	850	9.8	1170	7.5
220	15.4	540	12.3	860	9.7	1180	7.4
230	15.3	550	12.2	870	9.6	1190	7.3
240	15.2	560	12.1	880	9.6	1200	7.2
250	15.1	570	12.0	890	9.5	1210	7.2
260	15.0	580	12.0	900	9.4	1220	7.1
270	14.9	590	11.9	910	9.3	1230	7.0
280	14.8	600	11.8	920	9.2	1240	7.0
290	14.7	610	11.7	930	9.2	1250	6.9
300	14.6	620	11.6	940	9.1	1260	6.8
310	14.5	630	11.6	950	9.0	1270	6.8
320	14.4	640	11.4	960	8.9	1280	6.7
330	14.3	650	11.4	970	8.9	1290	6.7
340	14.2	660	11.3	980	8.8	1300	6.6
350	14.1	670	11.2	990	8.7	1310	6.5
360	14.0	680	11.2	1000	8.6	1320	6.5
						1330	6.4
						1340	6.4
						1350	6.3

Tabla 5A. Continuación.

	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0
-9.0	9.0	10.0	10.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	9.0	8.0	8.0	7.0	7.0	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
-8.5	10.0	10.0	9.0	9.0	10.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	7.0	7.0	7.0	6.0	6.0	6.0	5.0	4.0	4.0
-8.0	10.0	10.0	9.0	10.0	10.0	9.0	10.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	7.0	7.0	7.0	6.0	6.0	5.0	5.0	4.0	4.0
-7.5	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	7.0	7.0	6.0	7.0	7.0	5.0	4.0	4.0	4.0
-7.0	10.0	11.0	10.0	10.0	11.0	10.0	9.0	9.0	10.0	9.0	9.0	8.0	7.0	8.0	7.0	7.0	7.0	6.0	4.0	5.0	4.0
-6.5	11.0	11.0	10.0	11.0	11.0	10.0	9.0	10.0	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	7.0	8.0	7.0	5.0	5.0	5.0	4.0	4.0
-6.0	11.0	12.0	11.0	11.0	11.0	10.0	10.0	10.0	10.0	11.0	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	6.0	5.0	5.0	4.0	4.0
-5.5	12.0	12.0	11.0	11.0	11.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	7.0	7.0	5.0	4.0	5.0	5.0
-5.0	12.0	12.0	11.0	12.0	12.0	10.0	11.0	11.0	11.0	10.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	6.0	4.0	5.0	5.0	5.0
-4.5	12.0	12.0	12.0	12.0	13.0	11.0	11.0	11.0	9.0	10.0	10.0	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	6.0	5.0	5.0	5.0
-4.0	12.0	13.0	12.0	13.0	13.0	11.0	11.0	11.0	12.0	10.0	10.0	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	7.0	6.0	5.0	5.0	6.0
-3.5	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	11.0	12.0	12.0	11.0	10.0	11.0	11.0	10.0	10.0	8.0	8.0	8.0	7.0	6.0	6.0	6.0
-3.0	14.0	13.0	13.0	13.0	12.0	12.0	12.0	13.0	12.0	11.0	11.0	11.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	6.0	6.0	7.0	5.0
-2.5	14.0	13.0	13.0	14.0	13.0	13.0	13.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	6.0	5.0	6.0	6.0
-2.0	14.0	14.0	13.0	13.0	14.0	13.0	13.0	12.0	11.0	12.0	12.0	12.0	9.0	9.0	9.0	10.0	8.0	7.0	6.0	6.0	5.0
-1.5	14.0	15.0	15.0	15.0	14.0	13.0	13.0	13.0	12.0	12.0	13.0	12.0	10.0	10.0	10.0	10.0	8.0	6.0	6.0	6.0	4.0
-1.0	14.0	15.0	15.0	14.0	15.0	14.0	15.0	14.0	13.0	13.0	13.0	11.0	10.0	10.0	10.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	5.0
-0.5	14.0	17.0	17.0	16.0	16.0	15.0	14.0	14.0	13.0	13.0	12.0	11.0	11.0	11.0	9.0	8.0	7.0	7.0	7.0	7.0	4.0
0.0	14.0	17.0	17.0	16.0	16.0	15.0	14.0	14.0	14.0	13.0	13.0	12.0	11.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	8.0	8.0	5.0
0.5	16.0	17.0	17.0	18.0	18.0	16.0	16.0	16.0	15.0	14.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	10.0	9.0	8.0	8.0	6.0	6.0
1.0	20.0	19.0	19.0	18.0	18.0	16.0	16.0	16.0	14.0	14.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	10.0	9.0	9.0	9.0	6.0	5.0
1.5	20.0	20.0	19.0	19.0	19.0	18.0	18.0	18.0	16.0	16.0	16.0	15.0	13.0	13.0	12.0	11.0	11.0	9.0	8.0	7.0	6.0
2.0	21.0	21.0	20.0	20.0	19.0	18.0	18.0	17.0	17.0	16.0	16.0	15.0	14.0	13.0	12.0	12.0	11.0	10.0	8.0	7.0	6.0
2.5	22.0	22.0	21.0	21.0	20.0	19.0	19.0	17.0	17.0	17.0	17.0	15.0	14.0	13.0	13.0	11.0	11.0	9.0	8.0	8.0	7.0
3.0	22.0	22.0	21.0	21.0	20.0	19.0	18.0	17.0	17.0	16.0	15.0	15.0	13.0	12.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	6.0	5.0
3.5	22.0	21.0	21.0	20.0	20.0	18.0	18.0	18.0	17.0	16.0	15.0	15.0	13.0	12.0	12.0	12.0	10.0	10.0	8.0	7.0	6.0
4.0	22.0	21.0	21.0	20.0	20.0	18.0	18.0	17.0	16.0	15.0	15.0	14.0	12.0	12.0	12.0	10.0	10.0	8.0	7.0	6.0	5.0
4.5	22.0	21.0	20.0	20.0	19.0	18.0	18.0	16.0	16.0	15.0	14.0	13.0	12.0	12.0	12.0	9.0	9.0	8.0	7.0	5.0	5.0
5.0	22.0	21.0	20.0	20.0	19.0	18.0	17.0	16.0	16.0	14.0	14.0	13.0	12.0	12.0	10.0	9.0	9.0	7.0	6.0	5.0	5.0
5.5	22.0	21.0	20.0	19.0	19.0	17.0	17.0	16.0	15.0	14.0	14.0	13.0	11.0	10.0	10.0	9.0	9.0	6.0	6.0	4.0	5.0
6.0	21.0	20.0	19.0	18.0	17.0	17.0	15.0	14.0	14.0	12.0	12.0	11.0	10.0	9.0	9.0	7.0	5.0	5.0	4.0	3.0	3.0
6.5	21.0	20.0	19.0	18.0	18.0	16.0	16.0	15.0	13.0	13.0	12.0	12.0	10.0	9.0	8.0	7.0	7.0	5.0	5.0	4.0	2.0
7.0	21.0	19.0	18.0	17.0	18.0	16.0	16.0	15.0	13.0	12.0	11.0	9.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	5.0	3.0	1.0	1.0
7.5	20.0	19.0	18.0	17.0	17.0	15.0	14.0	14.0	12.0	11.0	11.0	10.0	9.0	8.0	8.0	6.0	5.0	5.0	3.0	1.0	1.0
8.0	19.0	18.0	17.0	16.0	16.0	14.0	13.0	12.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	6.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0
8.5	18.0	16.0	16.0	15.0	15.0	13.0	12.0	11.0	10.0	10.0	9.0	9.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	0.0	-1.0	-1.0
9.0	18.0	14.0	13.0	13.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	8.0	7.0	6.0	6.0	4.0	4.0	3.0	2.0	-1.0	-1.0	-2.0
9.5	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	10.0	9.0	8.0	7.0	6.0	6.0	4.0	3.0	2.0	1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-4.0	-4.0
10.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	10.0	10.0	8.0	7.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	-2.0	-2.0	-4.0	-5.0
10.5	12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	5.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-5.0
11.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	9.0	7.0	6.0	5.0	5.0	4.0	3.0	1.0	1.0	0.0	-1.0	-2.0	-4.0	-5.0	-6.0	-6.0
11.5	12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	8.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-5.0	-6.0	-7.0	-7.0
12.0	12.0	12.0	12.0	11.0	8.0	6.0	4.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	-1.0	-3.0	-3.0	-4.0	-4.0	-6.0	-6.0	-8.0	-8.0
12.5	12.0	12.0	12.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-8.0	-9.0	-9.0
13.0					0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0	-7.0	-8.0	-9.0	-11.0
13.5						0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-4.0	-5.0	-5.0	-6.0	-9.0	-10.0	-11.0
14.0							0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-3.0	-4.0	-5.0	-6.0	-9.0	-10.0	-12.0	-12.0
14.5								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-3.0	-5.0	-6.0	-7.0	-9.0	-11.0	-12.0	-13.0
15.0									0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-6.0	-7.0	-8.0	-10.0	-12.0	-13.0	-14.0
15.5										0.0	0.0	0.0	-1.0	-4.0	-6.0	-9.0	-12.0	-14.0	-15.0	-15.0	-15.0
16.0											0.0	0.0	-1.0	-5.0	-7.0	-9.0	-12.0	-15.0	-16.0	-17.0	-18.0
16.5												0.0	-1.0	-5.0	-7.0	-9.0	-12.0	-15.0	-17.0	-18.0	-19.0
17.0													-1.0	-5.0	-7.0	-9.0	-12.0	-15.0	-18.0	-19.0	-20.0
17.5														-1.0	-5.0	-7.0	-12.0	-15.0	-20.0	-21.0	-21.0
18.0															-1.0	-5.0	-12.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0
18.5																	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0
19.0																		-24.0	-24.0	-24.0	-24.0
19.5																			-24.0	-24.0	-24.0
20.0																				-24.0	-24.0

Tabla 5A Continuación.

MINERAS	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0
-9.0	4.0	4.0	2.0	2.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-3.0	-3.0	2.0	2.0
-8.5	4.0	3.0	2.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-3.0	-2.0	-2.0	2.0	2.0
-8.0	4.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	2.0	2.0
-7.5	4.0	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	2.0	2.0
-7.0	4.0	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	-1.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-1.0	-1.0	-1.0	3.0	3.0
-6.5	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0	2.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	3.0	3.0
-6.0	4.0	3.0	2.0	3.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	-1.0	-3.0	-4.0
-5.5	4.0	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.0	-3.0	-3.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
-5.0	5.0	4.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
-4.5	5.0	4.0	2.0	3.0	3.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0
-4.0	4.0	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0
-3.5	5.0	5.0	3.0	3.0	2.0	2.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-2.0
-3.0	5.0	5.0	3.0	2.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-3.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
-2.5	4.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-4.0
-2.0	5.0	4.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-3.0	-4.0	-5.0
-1.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-5.0
-1.0	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-5.0
-0.5	4.0	4.0	3.0	4.0	4.0	2.0	2.0	1.0	1.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-5.0
0.0	5.0	4.0	4.0	4.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-5.0
0.5	4.0	4.0	4.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-5.0
1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	3.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-3.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
1.5	6.0	6.0	6.0	5.0	3.0	3.0	2.0	2.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-1.0	-2.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
2.0	6.0	6.0	6.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
2.5	7.0	7.0	5.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
3.0	7.0	5.0	4.0	3.0	3.0	3.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
3.5	5.0	5.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
4.0	5.0	4.0	4.0	3.0	3.0	3.0	1.0	1.0	1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
4.5	5.0	4.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
5.0	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
5.5	5.0	3.0	1.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0
6.0	3.0	2.0	1.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-3.0	-4.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-6.0	-6.0	-7.0	-7.0	-7.0	-8.0
6.5	2.0	2.0	1.0	-1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-4.0	-4.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-6.0	-7.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
7.0	1.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0	-4.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-6.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
7.5	1.0	0.0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0	-4.0	-5.0	-5.0	-5.0	-6.0	-8.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0
8.0	1.0	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0	-4.0	-5.0	-5.0	-6.0	-7.0	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-10.0
8.5	-1.0	-3.0	-3.0	-3.0	-4.0	-5.0	-5.0	-7.0	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-11.0	-11.0
9.0	-2.0	-3.0	-3.0	-4.0	-6.0	-6.0	-6.0	-7.0	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-9.0	-11.0	-11.0	-12.0	-12.0	-12.0
9.5	-4.0	-5.0	-5.0	-7.0	-7.0	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-9.0	-10.0	-10.0	-11.0	-11.0	-11.0	-12.0	-12.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0
10.0	-5.0	-5.0	-6.0	-7.0	-7.0	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-10.0	-11.0	-11.0	-11.0	-12.0	-12.0	-12.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0
10.5	-5.0	-7.0	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-10.0	-10.0	-11.0	-11.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0
11.0	-6.0	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-10.0	-10.0	-10.0	-11.0	-11.0	-12.0	-12.0	-12.0	-13.0	-13.0	-14.0	-14.0	-14.0	-14.0	-14.0	-14.0
11.5	-7.0	-8.0	-8.0	-9.0	-10.0	-11.0	-11.0	-12.0	-13.0	-13.0	-13.0	-14.0	-14.0	-14.0	-14.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0
12.0	-8.0	-9.0	-10.0	-11.0	-11.0	-12.0	-13.0	-13.0	-13.0	-14.0	-14.0	-14.0	-14.0	-15.0	-15.0	-15.0	-15.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0
12.5	-9.0	-11.0	-11.0	-12.0	-12.0	-13.0	-14.0	-14.0	-14.0	-15.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-17.0	-17.0	-17.0	-17.0	-17.0	-17.0
13.0	-11.0	-11.0	-12.0	-13.0	-13.0	-14.0	-14.0	-14.0	-15.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-17.0	-17.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0
13.5	-11.0	-12.0	-13.0	-13.0	-14.0	-14.0	-15.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-17.0	-17.0	-17.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0
14.0	-12.0	-13.0	-13.0	-13.0	-13.0	-14.0	-16.0	-16.0	-16.0	-16.0	-17.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-19.0	-19.0	-19.0	-19.0
14.5	-13.0	-14.0	-15.0	-15.0	-15.0	-16.0	-17.0	-17.0	-17.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-19.0	-19.0	-19.0	-19.0	-19.0	-19.0
15.0	-14.0	-15.0	-16.0	-16.0	-17.0	-17.0	-17.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-18.0	-19.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0
15.5	-15.0	-16.0	-17.0	-18.0	-18.0	-19.0	-19.0	-19.0	-19.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-21.0
16.0	-16.0	-19.0	-19.0	-19.0	-20.0	-20.0	-20.0	-20.0	-21.0	-21.0	-21.0	-21.0	-21.0	-21.0	-21.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0
16.5	-19.0	-19.0	-20.0	-20.0	-20.0	-21.0	-21.0	-21.0	-21.0	-21.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0
17.0	-20.0	-20.0	-21.0	-21.0	-21.0	-21.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0
17.5	-21.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-22.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0
18.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0	-23.0
18.5	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0
19.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0
19.5	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0
20.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0	-24.0

FALLA DE ORIGEN

Tabla 6A. Horas Calor Diarias (unidades calor crecimiento) calculadas a partir de temperatura máxima y mínima diarias (Tabla preparada por Ing. Ignacio del Real L. INIA, 1982).

MIN/MAX	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0
-10.0	0	0	1	2	4	5	7	9	11	14	17	19	22	26	29	33	37	39	41	47	51	57	61
-9.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	30	34	36	40	44	48	53	57
-9.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	30	34	37	41	45	49	54	58
-8.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-8.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-7.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-7.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-6.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-6.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-5.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-5.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-4.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-4.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-3.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-3.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-2.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-2.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-1.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-1.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
-0.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
0.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
0.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
1.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
1.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
2.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
2.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
3.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
3.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
4.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
4.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
5.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
5.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
6.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
6.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
7.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
7.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
8.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
8.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
9.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
9.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
10.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
10.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
11.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
11.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
12.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
12.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
13.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
13.5	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59
14.0	0	0	1	2	3	4	5	7	9	11	14	17	20	23	27	31	34	38	42	46	50	55	59

FILIA DE ORIGEN

Tabla 6A. Continuación.

	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9	16.0
-10.0	51	55	60	64	68	72	76	81	86	90	95	100	104	109	117	119	127	138	145	158	167
-9.5	52	56	61	65	69	73	78	82	87	92	96	101	106	110	115	120	125	130	135	140	145
-9.0	53	57	61	65	70	74	79	84	89	93	98	102	107	112	116	122	127	132	137	142	147
-8.5	54	58	62	67	71	76	80	85	90	94	99	104	109	113	119	123	129	134	139	144	149
-8.0	55	59	63	68	72	77	82	86	91	96	100	105	110	115	120	125	130	136	141	146	151
-7.5	56	60	64	69	74	79	83	88	92	97	102	107	112	117	122	127	132	137	142	147	152
-7.0	57	61	65	70	75	80	85	89	94	99	104	109	114	119	124	129	134	139	144	149	154
-6.5	58	62	67	72	77	81	86	91	95	101	106	111	116	121	126	131	136	141	146	151	157
-6.0	59	63	68	73	78	83	87	92	97	102	108	113	118	123	128	133	138	143	148	153	159
-5.5	61	65	70	75	79	84	89	94	99	104	109	115	120	125	130	135	140	145	150	155	162
-5.0	62	67	71	76	81	86	91	96	101	106	111	116	122	127	132	137	143	148	153	159	164
-4.5	64	68	73	78	83	88	93	98	103	108	113	118	123	128	133	138	144	149	154	160	167
-4.0	65	70	74	79	84	89	94	99	104	109	114	119	124	129	134	139	145	150	155	161	167
-3.5	66	71	76	81	87	92	97	102	107	112	117	122	127	132	137	142	148	153	159	164	169
-3.0	68	73	78	83	89	94	99	104	109	115	120	125	131	136	141	147	153	158	164	169	175
-2.5	70	75	80	85	90	95	101	106	112	117	122	128	133	139	144	150	155	161	166	172	178
-2.0	72	77	82	87	92	97	103	108	114	119	125	131	136	141	147	152	158	164	169	175	181
-1.5	74	79	84	89	95	100	106	111	117	122	128	133	139	144	150	155	161	167	173	179	184
-1.0	76	81	87	92	97	103	108	114	119	125	130	136	142	147	153	158	164	169	175	181	187
-0.5	78	84	89	95	100	105	111	116	122	128	133	139	145	151	156	162	168	173	179	185	191
0.0	81	86	92	97	103	108	114	119	125	131	137	142	148	154	160	165	171	177	183	189	194
0.5	83	89	94	100	106	111	117	123	129	134	140	146	151	157	163	169	174	180	186	192	198
1.0	86	92	97	102	107	113	119	124	130	135	141	147	152	158	163	169	174	180	186	192	198
1.5	89	95	101	106	112	118	124	129	135	141	147	152	158	163	169	174	180	186	192	198	202
2.0	92	98	104	110	115	121	127	132	138	144	149	155	160	166	172	178	184	190	196	202	206
2.5	96	102	108	114	120	125	131	137	143	149	154	160	165	171	177	183	189	194	200	206	210
3.0	100	106	112	118	124	130	135	141	147	153	159	164	170	175	181	187	192	198	204	210	214
3.5	104	110	116	122	128	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188	194	200	206	212	218	224
4.0	109	115	121	127	133	139	145	151	157	163	169	175	181	187	193	199	205	211	217	223	229
4.5	114	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234
5.0	120	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240
5.5	126	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246
6.0	132	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252
6.5	138	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258
7.0	144	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264
7.5	150	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270
8.0	156	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276
8.5	162	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282
9.0	168	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288
9.5	174	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
10.0	180	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300
10.5	186	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306
11.0	192	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312
11.5	198	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318
12.0	204	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324
12.5	210	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330
13.0	216	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336
13.5	222	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342
14.0	228	234	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348
14.5		246	252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360
15.0			252	258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360
15.5				258	264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360
16.0					264	270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360
16.5						270	276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360
17.0							276	282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360
17.5								282	288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360
18.0									288	294	300	306	312	318	324	330	336	342	348	354	360

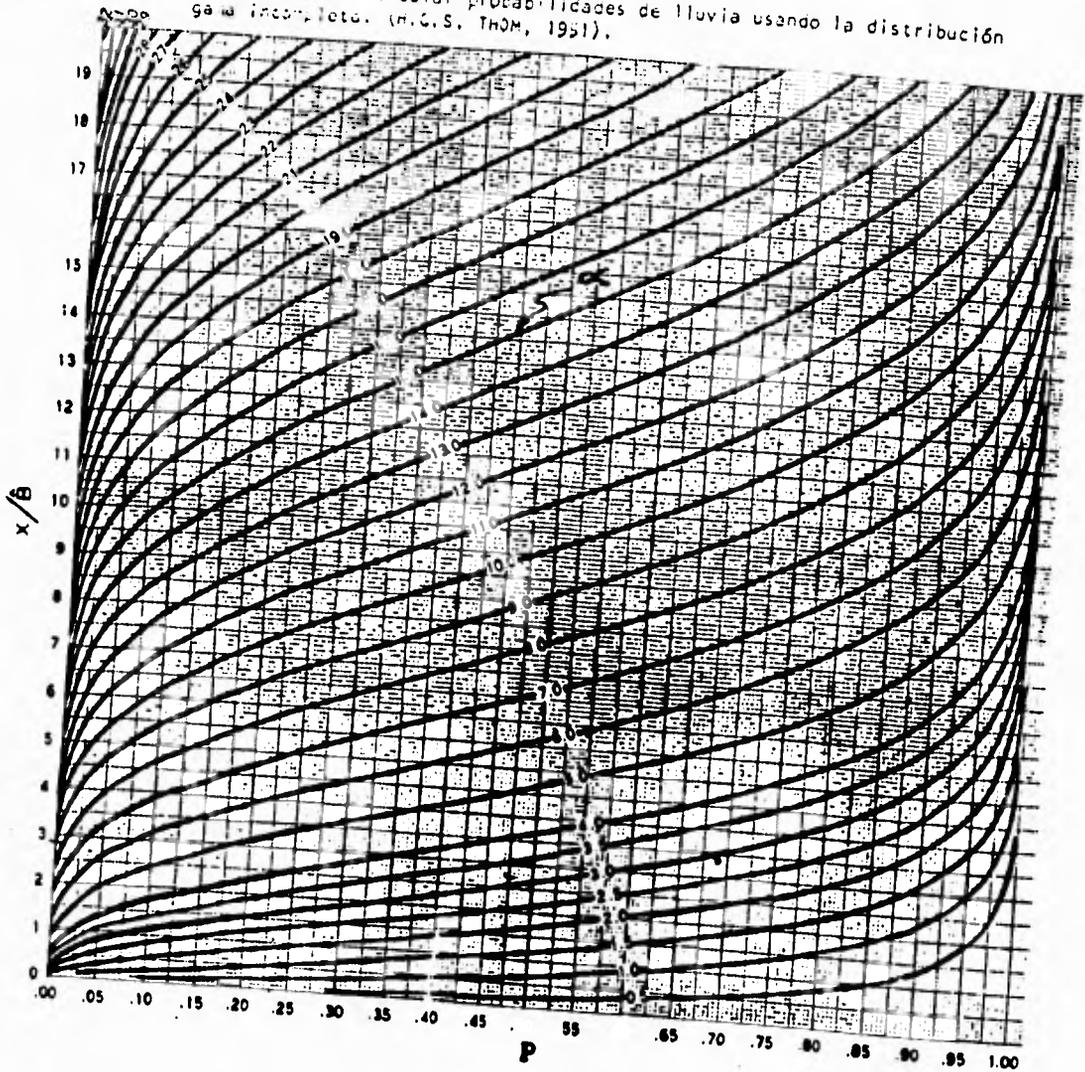
1970
 1971
 1972
 1973
 1974
 1975
 1976
 1977
 1978
 1979
 1980
 1981
 1982
 1983
 1984
 1985
 1986
 1987
 1988
 1989
 1990
 1991
 1992
 1993
 1994
 1995
 1996
 1997
 1998
 1999
 2000
 2001
 2002
 2003
 2004
 2005
 2006
 2007
 2008
 2009
 2010
 2011
 2012
 2013
 2014
 2015
 2016
 2017
 2018
 2019
 2020
 2021
 2022
 2023
 2024
 2025
 2026
 2027
 2028
 2029
 2030

VALIA DE ORIGEN

VALIA DE DESTINO

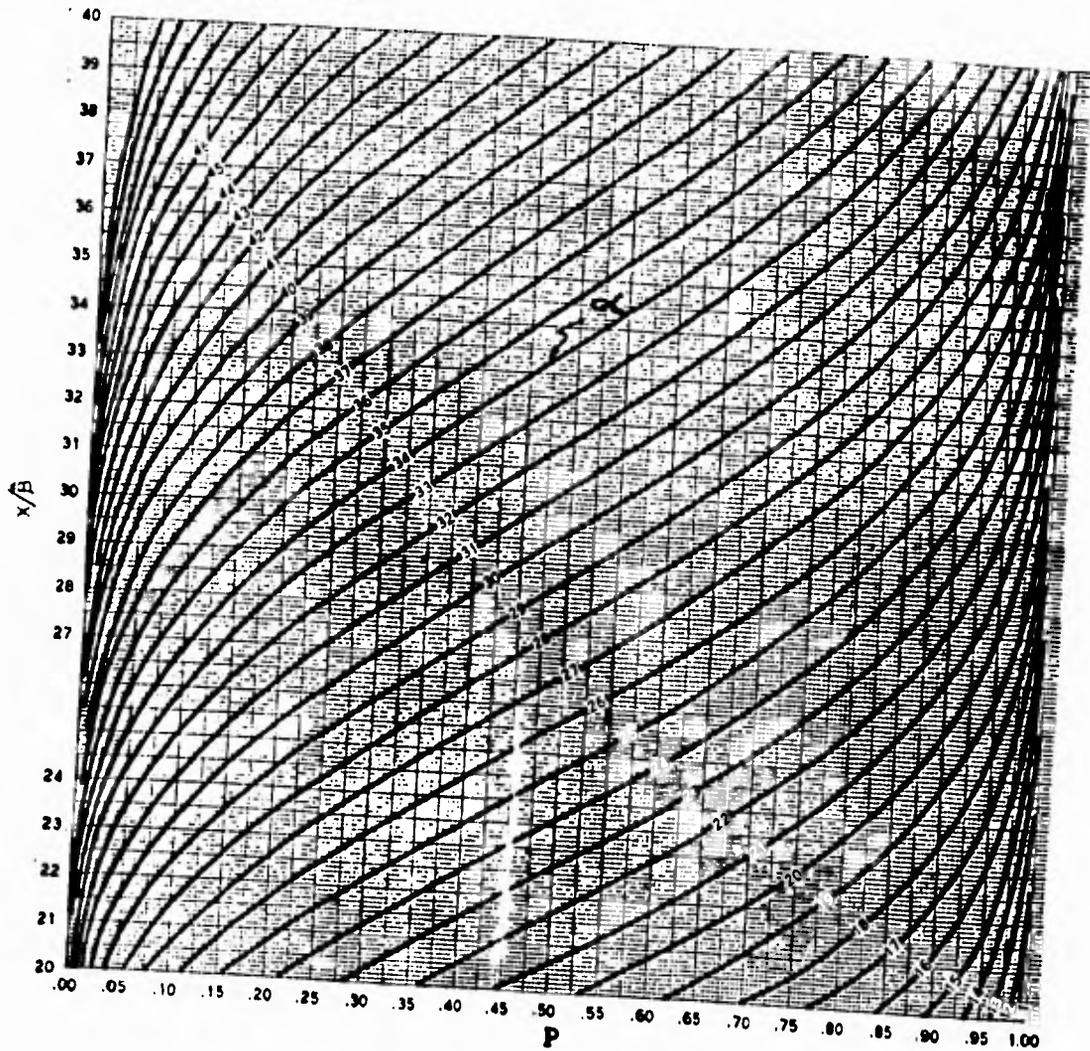
VALIA DE ORIGEN	14.0	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0	33.5	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0	36.5	37.0	37.5	38.0	38.5	39.0	39.5	40.0	40.5	41.0	41.5	42.0	42.5	43.0	43.5	44.0	44.5	45.0	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5	48.0	48.5	49.0	49.5	50.0	50.5	51.0	51.5	52.0	52.5	53.0	53.5	54.0	54.5	55.0	55.5	56.0	56.5	57.0	57.5	58.0	58.5	59.0	59.5	60.0	60.5	61.0	61.5	62.0	62.5	63.0	63.5	64.0	64.5	65.0	65.5	66.0	66.5	67.0	67.5	68.0	68.5	69.0	69.5	70.0	70.5	71.0	71.5	72.0	72.5	73.0	73.5	74.0	74.5	75.0	75.5	76.0	76.5	77.0	77.5	78.0	78.5	79.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.5	82.0	82.5	83.0	83.5	84.0	84.5	85.0	85.5	86.0	86.5	87.0	87.5	88.0	88.5	89.0	89.5	90.0	90.5	91.0	91.5	92.0	92.5	93.0	93.5	94.0	94.5	95.0	95.5	96.0	96.5	97.0	97.5	98.0	98.5	99.0	99.5	100.0																																																																																																																																																																																																																																																
14.0	143	149	153	157	161	166	170	174	178	182	185	188	192	195	197	202	207	209	210	212	215	217	220	222	224	226	228	230	232	234	236	238	240	242	244	246	248	250	252	254	256	258	260	262	264	266	268	270	272	274	276	278	280	282	284	286	288	290	292	294	296	298	300	302	304	306	308	310	312	314	316	318	320	322	324	326	328	330	332	334	336	338	340	342	344	346	348	350	352	354	356	358	360	362	364	366	368	370	372	374	376	378	380	382	384	386	388	390	392	394	396	398	400	402	404	406	408	410	412	414	416	418	420	422	424	426	428	430	432	434	436	438	440	442	444	446	448	450	452	454	456	458	460	462	464	466	468	470	472	474	476	478	480	482	484	486	488	490	492	494	496	498	500	502	504	506	508	510	512	514	516	518	520	522	524	526	528	530	532	534	536	538	540	542	544	546	548	550	552	554	556	558	560	562	564	566	568	570	572	574	576	578	580	582	584	586	588	590	592	594	596	598	600	602	604	606	608	610	612	614	616	618	620	622	624	626	628	630	632	634	636	638	640	642	644	646	648	650	652	654	656	658	660	662	664	666	668	670	672	674	676	678	680	682	684	686	688	690	692	694	696	698	700	702	704	706	708	710	712	714	716	718	720	722	724	726	728	730	732	734	736	738	740	742	744	746	748	750	752	754	756	758	760	762	764	766	768	770	772	774	776	778	780	782	784	786	788	790	792	794	796	798	800	802	804	806	808	810	812	814	816	818	820	822	824	826	828	830	832	834	836	838	840	842	844	846	848	850	852	854	856	858	860	862	864	866	868	870	872	874	876	878	880	882	884	886	888	890	892	894	896	898	900	902	904	906	908	910	912	914	916	918	920	922	924	926	928	930	932	934	936	938	940	942	944	946	948	950	952	954	956	958	960	962	964	966	968	970	972	974	976	978	980	982	984	986	988	990	992	994	996	998	1000

Tabla 7A. Nomograma para calcular probabilidades de lluvia usando la distribución gamma incompleta. (H.C.S. THOM, 1951).



FALLA DE ORIGEN

Tabla 7A. Continuación.



1977-78

Tabla 8A. Distribución Poisson Acumulativa (C.T. Haan, 1977. Statistical Methods in Hydrology, I.S.U. Press.).

n	II								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.9000	0.8187	0.7408	0.6670	0.5980	0.5338	0.4744	0.4198	0.3699
2	0.9913	0.9225	0.8631	0.8134	0.7735	0.7334	0.6931	0.6526	0.6119
3	0.9980	0.9900	0.9807	0.9702	0.9585	0.9456	0.9314	0.9160	0.8994
4	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
6	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

n	III								
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
1	0.3679	0.2231	0.1353	0.0821	0.0470	0.0263	0.0140	0.0072	0.0037
2	0.5937	0.4464	0.3234	0.2231	0.1403	0.0821	0.0470	0.0263	0.0140
3	0.8070	0.6770	0.5403	0.4169	0.3020	0.2003	0.1170	0.0639	0.0348
4	0.9463	0.8347	0.7203	0.6050	0.4909	0.3800	0.2733	0.1718	0.0993
5	0.9943	0.9357	0.8770	0.8187	0.7608	0.7034	0.6465	0.5901	0.5342
6	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
7	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
8	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
9	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
10	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
11	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
12	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
13	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
14	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
15	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
16	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

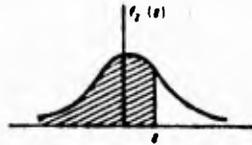
n	IV								
	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5
0	0.0041	0.0025	0.0015	0.0009	0.0006	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001
1	0.0266	0.0174	0.0113	0.0073	0.0047	0.0030	0.0019	0.0012	0.0008
2	0.0896	0.0620	0.0400	0.0256	0.0163	0.0101	0.0062	0.0038	0.0022
3	0.2017	0.1512	0.1018	0.0618	0.0391	0.0249	0.0151	0.0090	0.0050
4	0.3575	0.2811	0.2212	0.1709	0.1211	0.0766	0.0490	0.0303	0.0180
5	0.5290	0.4517	0.3800	0.3087	0.2410	0.1812	0.1240	0.0757	0.0430
6	0.6860	0.6083	0.5254	0.4372	0.3530	0.2727	0.2000	0.1340	0.0800
7	0.8095	0.7400	0.6700	0.6000	0.5200	0.4500	0.3800	0.3100	0.2400
8	0.8966	0.8472	0.7916	0.7316	0.6620	0.5975	0.5231	0.4537	0.3810
9	0.9462	0.9161	0.8774	0.8395	0.7966	0.7466	0.6930	0.6374	0.5710
10	0.9767	0.9574	0.9332	0.9055	0.8722	0.8344	0.7916	0.7466	0.6955
11	0.9900	0.9799	0.9661	0.9488	0.9280	0.9031	0.8747	0.8430	0.8070
12	0.9955	0.9912	0.9830	0.9710	0.9553	0.9362	0.9130	0.8850	0.8530
13	0.9983	0.9966	0.9929	0.9872	0.9782	0.9650	0.9480	0.9270	0.9020
14	0.9995	0.9990	0.9970	0.9931	0.9872	0.9782	0.9650	0.9480	0.9270
15	0.9998	0.9995	0.9980	0.9950	0.9916	0.9857	0.9762	0.9630	0.9465
16	0.9999	0.9996	0.9980	0.9950	0.9916	0.9857	0.9762	0.9630	0.9465
17	1.0000	0.9999	0.9996	0.9980	0.9950	0.9916	0.9857	0.9762	0.9630
18	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
19	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
20	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
21	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
22	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
23	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
24	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

n	V									
	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
1	0.0000	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
2	0.0000	0.0012	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
3	0.0000	0.0049	0.0023	0.0010	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	
4	0.0000	0.0151	0.0076	0.0037	0.0019	0.0010	0.0005	0.0002	0.0001	
5	0.0000	0.0375	0.0211	0.0117	0.0063	0.0034	0.0019	0.0010	0.0005	
6	0.0000	0.0726	0.0458	0.0259	0.0142	0.0076	0.0041	0.0022	0.0012	
7	0.0000	0.1212	0.0805	0.0461	0.0261	0.0136	0.0070	0.0038	0.0020	
8	0.0000	0.1820	0.1240	0.0708	0.0421	0.0236	0.0120	0.0060	0.0030	
9	0.0000	0.2470	0.1685	0.1018	0.0574	0.0314	0.0160	0.0080	0.0040	
10	0.0000	0.3080	0.2072	0.1277	0.0717	0.0385	0.0200	0.0100	0.0050	
11	0.0000	0.3599	0.2406	0.1452	0.0850	0.0460	0.0240	0.0120	0.0060	
12	0.0000	0.4057	0.2670	0.1603	0.0960	0.0520	0.0270	0.0130	0.0070	
13	0.0000	0.4464	0.2887	0.1730	0.1050	0.0570	0.0290	0.0140	0.0070	
14	0.0000	0.4831	0.3051	0.1835	0.1120	0.0610	0.0310	0.0150	0.0080	
15	0.0000	0.5157	0.3180	0.1910	0.1170	0.0640	0.0320	0.0150	0.0080	
16	0.0000	0.5443	0.3275	0.1960	0.1200	0.0660	0.0330	0.0150	0.0080	
17	0.0000	0.5689	0.3338	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
18	0.0000	0.5896	0.3371	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
19	0.0000	0.6064	0.3385	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
20	0.0000	0.6195	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
21	0.0000	0.6289	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
22	0.0000	0.6347	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
23	0.0000	0.6370	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
24	0.0000	0.6368	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
25	0.0000	0.6343	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
26	0.0000	0.6296	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
27	0.0000	0.6228	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
28	0.0000	0.6141	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
29	0.0000	0.6037	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
30	0.0000	0.5918	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
31	0.0000	0.5785	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
32	0.0000	0.5639	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
33	0.0000	0.5482	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
34	0.0000	0.5316	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
35	0.0000	0.5143	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
36	0.0000	0.4965	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	
37	0.0000	0.4784	0.3390	0.1990	0.1220	0.0670	0.0330	0.0150	0.0080	

Tabla 9A . Distribución normal estandarizada (Saïd Infante y G. Zárate de Lara. Métodos Estadísticos, Edit. Trilles).

Probabilidades acumuladas de la distribución Normal estandar

La tabla de el área a la izquierda de un valor de Z o sea: $\int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt$.



Z	0.0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
-3.5	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
-3.4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
-3.3	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
-3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005
-3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
-3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
-2.9	0.0018	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
-2.8	0.0026	0.0026	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
-2.7	0.0036	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
-2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
-2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
-2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0076	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
-2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
-2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0118	0.0116	0.0113	0.0110
-2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
-2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
-1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
-1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
-1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0376	0.0367
-1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
-1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
-1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
-1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
-1.2	0.1161	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
-1.1	0.1357	0.1326	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
-1.0	0.1567	0.1542	0.1529	0.1515	0.1492	0.1468	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
-0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1636	0.1611
-0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2006	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
-0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2264	0.2233	0.2202	0.2171	0.2140
-0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
-0.5	0.3085	0.3050	0.3016	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
-0.4	0.3448	0.3408	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
-0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
-0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4014	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
-0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
-0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641

Tabla 10A.

VALORES DEL FACTOR DE PONDERACION W PARA LOS EFECTOS DE LA RADIACION SOBRE
LA ETO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y ALTITUDES

Temperatura °C	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
w a una altitud de (en m) 0	0.43	.46	.49	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.68	.71	.73	.75	.77*	.78	.80	.82	.83	.84	.85
500	.44	.48	.51	.54	.57	.60	.62	.65	.67	.70	.72	.74	.76	.78	.79	.81	.82	.84	.85	.86
1 000	.46	.49	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.75	.77	.79	.80	.82	.83	.85	.86	.87
2 000	.49	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.75	.77	.79	.81	.82	.84	.85	.86	.87	.88
3 000	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.75	.77	.79	.81	.82	.84	.85	.86	.87	.88	.89
4 000	.54	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.75	.77	.79	.81	.82	.84	.85	.86	.87	.89	.90	.90

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

Tabla 11A. PRESION DE SATURACION DE VAPOR(e_s) EN MILIBARES COMO UNA FUNCION DE LA TEMPERATURA($^{\circ}C$)
(DOORENBOS, 1976)

T	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	6.1	6.2	6.2	6.2	6.3	6.3	6.4	6.4	6.5	6.5
1	6.6	6.6	6.7	6.7	6.7	6.8	6.9	6.9	7.0	7.0
2	7.1	7.1	7.2	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5	7.5
3	7.6	7.6	7.7	7.7	7.8	7.9	7.9	8.0	8.0	8.1
4	8.1	8.2	8.2	8.3	8.4	8.4	8.5	8.5	8.6	8.7
5	8.7	8.8	8.8	8.9	9.0	9.0	9.1	9.2	9.2	9.3
6	9.4	9.4	9.5	9.5	9.6	9.7	9.7	9.8	9.9	9.9
7	10.1	10.1	10.2	10.2	10.3	10.4	10.4	10.5	10.6	10.7
8	10.7	10.8	10.9	10.9	11.0	11.1	11.2	11.2	11.3	11.4
9	11.5	11.6	11.6	11.7	11.8	11.9	12.0	12.0	12.1	12.2
10	12.3	12.4	12.4	12.5	12.6	12.7	12.8	12.9	13.0	13.0
11	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.7	13.8	13.9
12	14.0	14.1	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6	14.7	14.8	14.9
13	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6	15.7	15.8	15.9
14	16.0	16.1	16.2	16.3	16.4	16.5	16.6	16.7	16.8	16.9
15	17.0	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	18.1
16	18.2	18.3	18.4	18.5	18.6	18.8	18.9	19.0	19.1	19.3
17	19.4	19.5	19.6	19.7	19.9	20.0	20.1	20.2	20.4	20.5
18	20.6	20.8	20.9	21.0	21.2	21.3	21.4	21.6	21.7	21.8
19	22.0	22.1	22.2	22.4	22.5	22.7	22.8	22.9	23.1	23.2
20	23.4	23.5	23.7	23.8	24.0	24.1	24.3	24.4	24.6	24.7
21	24.9	25.0	25.2	25.3	25.5	25.6	25.8	26.0	26.1	26.3
22	26.4	26.6	26.8	26.9	27.1	27.3	27.4	27.6	27.8	27.9
23	28.1	28.3	28.4	28.6	28.8	29.0	29.1	29.3	29.5	29.7
24	29.8	30.0	30.2	30.4	30.6	30.7	30.9	31.1	31.3	31.5
25	31.7	31.9	32.1	32.2	32.4	32.6	32.8	33.0	33.2	33.4
26	33.6	33.8	34.0	34.2	34.4	34.6	34.8	35.0	35.2	35.4
27	35.7	35.9	36.1	36.3	36.5	36.7	36.9	37.1	37.4	37.6
28	37.8	38.0	38.2	38.5	38.7	38.9	39.1	39.4	39.6	39.8
29	40.1	40.3	40.5	40.8	41.0	41.2	41.5	41.7	42.0	42.2
30	42.4	42.7	42.9	43.2	43.4	43.7	43.9	44.2	44.4	44.7
31	44.9	45.2	45.4	45.7	46.0	46.2	46.5	46.8	47.0	47.3
32	47.6	47.8	48.1	48.4	48.6	48.9	49.2	49.5	49.8	50.0
33	50.3	50.6	50.9	51.2	51.5	51.7	52.0	52.3	52.6	52.9
34	53.2	53.5	53.8	54.1	54.4	54.7	55.0	55.3	55.6	55.9
35	56.2	56.6	56.9	57.2	57.5	57.8	58.1	58.5	58.8	59.1
36	59.4	59.8	60.1	60.4	60.7	61.1	61.4	61.7	62.1	62.4
37	62.8	63.1	63.5	63.8	64.1	64.5	64.8	65.2	65.6	65.9
38	66.3	66.6	67.0	67.4	67.7	68.1	68.5	68.8	69.2	69.5
39	69.9	70.3	70.7	71.1	71.5	71.8	72.2	72.6	73.0	73.4

PRESION BAROMETRICA A DIFERENTES ALTITUDES EN MILIBARES

ALTITUD	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	1013	1001	990	978	967	955	944	933	921	910
1000	899	888	877	867	856	845	835	825	816	805
2000	795	785	776	766	757	747	738	729	719	710
3000	701	693	684	676	667	658	650	641	633	624
4000	616	608	600	593	585	577	570	562	555	547
5000	540	533	526	519	512	505	498	492	485	479

Tabla 13A. VALORES DEL FACTOR DE PONDERACION (1-W) PARA LOS EFECTOS DEL VIENTO Y DE LA HUMEDAD SOBRE
IA ETO A DIFERENTES TEMPERATURAS Y ALTITUDES

Temperatura °C	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	40		
(1-W) a una altitud de (en m)	0	0.57	.54	.51	.48	.45	.42	.39	.36	.34	.32	.29	.27	.25	.23*	.22	.20	.18	.17	.16	.15
500		.56	.52	.49	.46	.43	.41	.38	.35	.33	.30	.28	.26	.24	.22	.21	.19	.18	.16	.15	.14
1 000		.54	.51	.48	.45	.42	.39	.36	.34	.31	.29	.27	.25	.23	.21	.20	.18	.17	.15	.14	.13
2 000		.51	.48	.45	.42	.39	.36	.34	.31	.29	.27	.25	.23	.21	.19	.18	.16	.15	.14	.13	.12
3 000		.48	.45	.42	.39	.36	.34	.31	.29	.27	.25	.23	.21	.19	.18	.16	.15	.14	.13	.12	.11
4 000		.46	.42	.39	.36	.34	.31	.29	.27	.25	.23	.21	.19	.18	.16	.15	.14	.13	.12	.11	.10

FALLA DE ORIGEN

Tabla 14A. FACTOR DE CONVERSION DE LA RADIACION EXTRATERRESTRE EN RADIACION SOLAR NETA, R_{no} , PARA UNA REFLEXION OX
DADA DE UN 29% Y DIFERENTES RELACIONES ENTRE LAS HORAS REALES DE INSOLACION Y LAS MAXIMAS
POSIBLES $(1-\alpha)$ (0,25 + 0,50 n/N)

n/N	0.0	.05	.10	.15	.20	.25	.30	.35	.40	.45	.50	.55	.60	.65	.70	.75	.80	.85	.90	.95	1.00
$(1-\alpha)(0.25 + 0.50 n/N)$	0.19	.21	.22	.24	.26	.28	.30	.32	.34	.36	.37	.39	.41	.43	.45	.47	.49	.51	.52	.54	.56

Tabla 15A. CORRECCION PARA LA TEMPERATURA $t(t)$ CON RESPECTO A LA RADIACION DE ONDAS LARGAS R_{nl}

$t^{\circ}C$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
$t(t) = \sigma T_k^4$	11.0	11.4	11.7	12.0	12.4	12.7	13.1	13.5	13.8	14.2	14.6	15.0	15.4	15.9	16.3	16.7	17.2	17.7	18.1

Tabla 16A. CORRECCION PARA LA PRESION DEL VAPOR $f(ed)$ R_{nl} CON RESPECTO A LA RADIACION DE ONDAS LARGAS

ed mbar	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$f(ed) = 0.34 - 0.044 \sqrt{ed}$.23	.22	.20	.19	.18	.16	.15	.14	.13	.12	.12	.11	.10	.09	.08	.08	.07	.06

Tabla 17A. CORRECCION PARA LA RELACION ENTRE LAS HORAS REALES DE FUERTE INSOLACION Y LAS MAXIMAS POSIBLES $f(n/N)$
CON RESPECTO A LA RADIACION DE ONDAS LARGAS R_{nl}

n/N	0	.05	.1	.15	.2	.25	.3	.35	.4	.45	.5	.55	.6	.65	.7	.75	.8	.85	.9	.95	1.0
$f(n/N) = 0.140.9 n/N$.10	.15	.19	.24	.28	.33	.37	.42	.46	.51	.55	.60	.64	.69	.73	.78	.82	.87	.91	.94	1.00

Tabla 18A.

Factor de corrección c en la ecuación de Petran

ES, no/día	RH _{max} = 30 %				RH _{max} = 60 %				RH _{max} = 90 %			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
Udfe, c/o												
Udfe/Noche = 4.0												
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.95	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.79	.84	.92	.97	.92	1.00	1.11	1.19	.99	1.10	1.27	1.42
6	.68	.77	.87	.93	.85	.96	1.11	1.19	.94	1.10	1.26	1.53
9	.55	.65	.78	.90	.76	.88	1.02	1.14	.88	1.01	1.16	1.27
Udfe/Noche = 3.0												
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.95	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.76	.81	.88	.94	.87	.95	1.06	1.12	.94	1.04	1.18	1.28
6	.61	.68	.81	.88	.77	.88	1.02	1.10	.86	1.01	1.15	1.22
9	.46	.56	.72	.82	.67	.79	.88	1.05	.78	.92	1.06	1.16
Udfe/Noche = 2.0												
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.69	.76	.85	.92	.83	.91	.99	1.05	.89	.98	1.10	1.14
6	.53	.61	.74	.84	.70	.80	.94	1.02	.79	.92	1.05	1.12
9	.37	.48	.65	.76	.59	.70	.84	.95	.71	.81	.96	1.06
Udfe/Noche = 1.0												
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.64	.71	.82	.89	.78	.86	.94	.99	.85	.92	1.01	1.05
6	.43	.53	.68	.79	.62	.70	.84	.93	.72	.82	.95	1.00
9	.27	.41	.59	.70	.50	.60	.75	.87	.62	.72	.87	.96

FALLA DE ORIGEN