

SEPSA

Centro Interamericano de
Documentación e
Información Agrícola

1 NOV 1991

IICA — CIDIA

INFORME FINAL CONSULTORIA

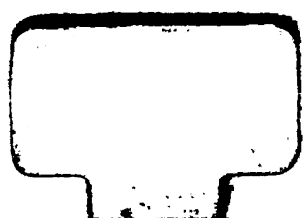
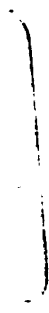
Oscar E. Rojas

IICA
P40
R741

SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION
PARA LA AGRICULTURA
IICA

SAN JOSE, COSTA RICA
Enero, 1991



MEMORANDO



A: José A. Holguín, Coordinador
Plan de Acción de la Oficina del
IICA en Costa Rica

DE: Oscar E. Rojas, Consultor
IICA/SEPSA en Agroclimatología

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Oscar E. Rojas".

ASUNTO: Informe Final de Consultoría

FECHA: 6 de Octubre de 1987

1. Sirva el presente para informar sobre los principales logros obtenidos durante los 3 meses (del 13 de julio a 12 de octubre) de consultoría en Agroclimatología y zonificación de cultivos dada al equipo de trabajo de SEPSA. (Se adjuntan los términos de referencia acordados).
2. Se brindó capacitación formal y en servicio al equipo de zonificación de SEPSA. Para estos efectos se impartieron conferencias de carácter teórico cuyos temas aparecen en los programas adjuntos y se desarrollaron trabajos prácticos con el equipo.
3. Se preparó en forma escrita un documento por tema tratado en cada conferencia:
 - a. La Agroclimatología en la planificación agropecuaria, 22 p.
 - b. Variables agroclimáticas necesarias para el proceso de zonificación agroecológica de cultivos, 21 p.
 - c. Nociones generales sobre la evapotranspiración y las transferencias de agua, 14 p.

00007564

~~01000355~~

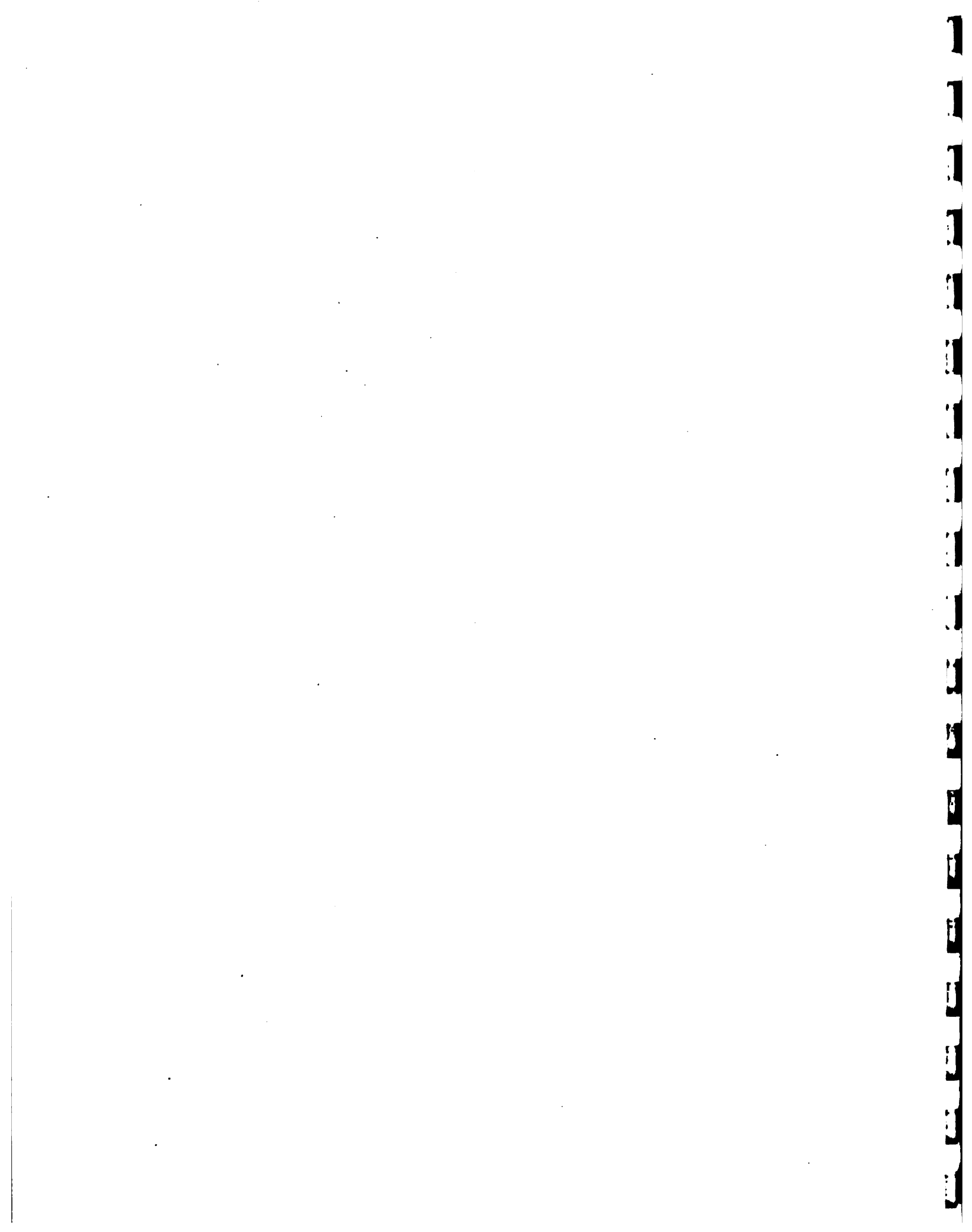
100
010
R 711



4. Se realizó una gira a la Estación Agrometeorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) donde se dio a conocer al equipo de trabajo el instrumental meteorológico que mide las variables climáticas que son empleadas en el proceso de zonificación.
5. Se preparó y desarrolló un curso-taller sobre modelos de producción de biomasa. En este taller se vieron los aspectos teóricos generales del modelo. A cada técnico del grupo de zonificación se le enseñó a calcular el índice de producción potencial que se basa en el conocimiento del metabolismo de fotosíntesis y respiración del cultivo (según sea este C_4 o C_3).
6. Se diseñaron e implementaron las metodologías necesarias:
 - a. Para la identificación de zonas con mayor aptitud agroecológica para cultivos anuales;
 - b. Para identificar la fecha de siembra más adecuada para el desarrollo de los cultivos anuales.
7. Las metodologías anteriores aparecen descritas en el documento titulado "Determinación de la fecha de siembra de los cultivos anuales y su posterior zonificación agroecológica".
8. Se agradece la oportunidad brindada por ambas instituciones y quedo a la orden de la mismas para cualquier consulta futura en este campo.

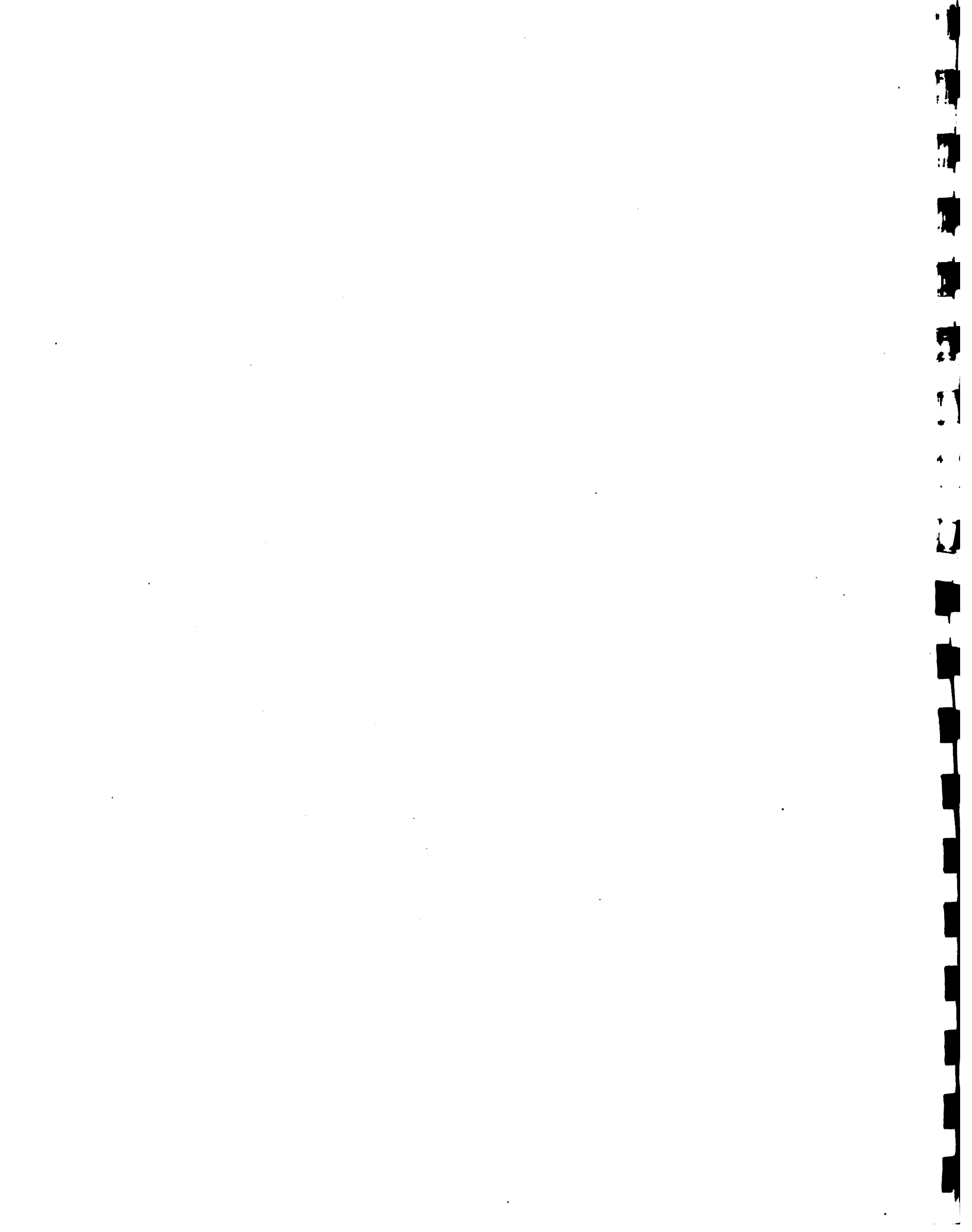
Muy Atentamente

C.C.: Ing. Javier Weiss, Coordinador Depto. Recursos Agropecuarios, SEPSA
Ing. Ezequiel García J.; Director Ejecutivo, SEPSA
Ing. Rodolfo Martínez, Director Area Central, IICA
Dr. Harlan Davis, Subdirector General, IICA



TERMINOS DE REFERENCIA

1. Diseñar e implementar una metodología que permita la identificación de zonas con mayor aptitud agroecológica para cultivos anuales (los resultados deben estar en concordancia con la duración del ciclo del cultivo).
2. Diseñar e implementar una metodología capaz de identificar la época de siembra más apropiada para el desarrollo de los cultivos (desarrollar un ejemplo).
3. Elaborar un manual que permita la aplicación de las metodologías anteriormente mencionadas.
4. Dar la capacitación formal en los aspectos teóricos relacionados con las variables agroclimáticas utilizadas en el proceso de zonificación (Balance de radiación, balance de energía, evapotranspiración potencial, balance hídrico teórico, etc.).
5. Brindar capacitación en servicio al equipo técnico asignado al Programa de Zonificación Agropecuaria.
6. Preparar el material didáctico que se requiera para brindar dicha capacitación.
7. Preparar y dictar una conferencia-taller sobre modelos de producción de biomasa y su posible incorporación al esquema metodológico de zonificación de SEPSA.



CONFERENCIA I

1. Aspectos generales introductorios
 - 1.1 Qué es la Agroclimatología
 - 1.2 Diferencia con la Meteorología
 - 1.3 Agrometeorología vs. Agroclimatología

2. Tres tipos de análisis agroclimático
 - 2.1 Estudio frecuencial de la precipitación con relación a la ETP
 - 2.2 Balance hídrico teórico
 - 2.2.1 Ecuación del balance hídrico
 - 2.2.2 Estudio de los riegos de sequía y exceso de agua
 - 2.2.3 Estudio de la diferencia de evapotranspiración
 - 2.3 Zonificación agroecológica de cultivos

3. Perspectivas futuras con la utilización de imágenes satélites

4. Discusión continuación del programa de trabajo para la capacitación en Servicio del equipo de zonificación de SEPSA.



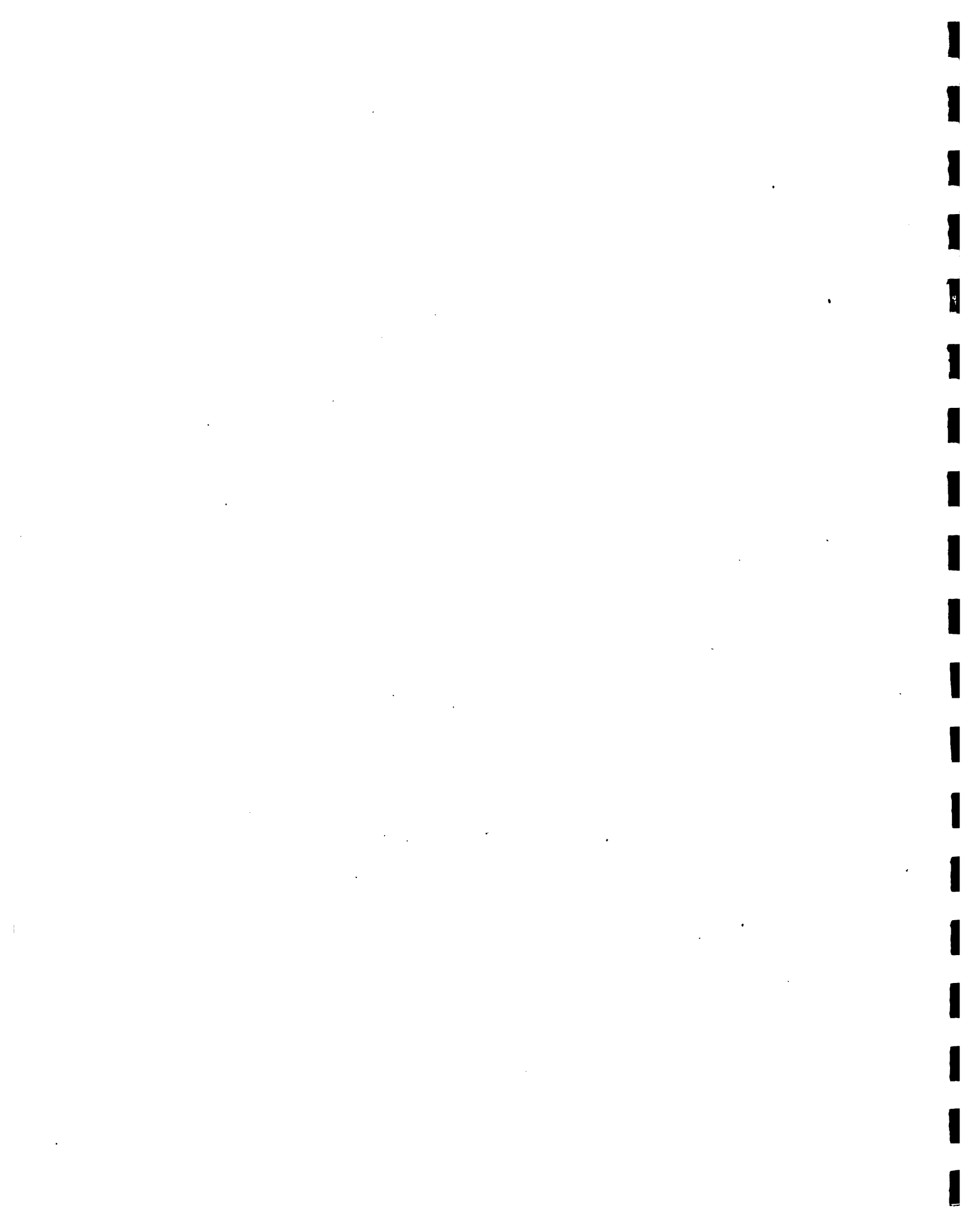
CONFERENCIA II
RADIACION SOLAR

OBJETIVO

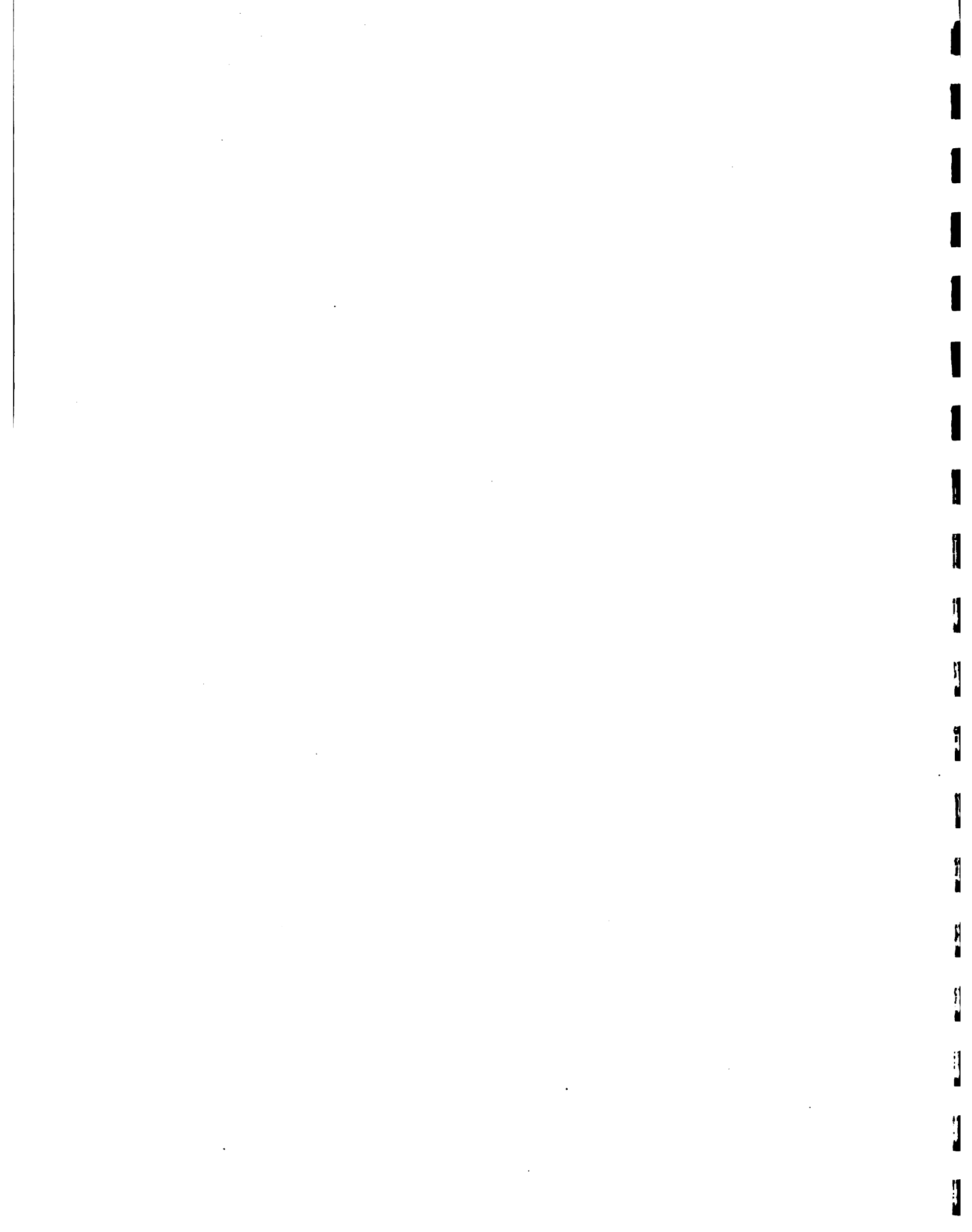
En estas conferencias (II y III) se pretende dar algunas bases teóricas para el uso adecuado de las principales variables climáticas relacionadas con la producción agrícola.

PROGRAMA

1. Terminología y conceptualización
2. Características del espectro solar
3. Efecto de la atmósfera sobre la radiación
 - a. Absorción
 - b. Transmisión
 - c. Reflexión
 - d. Dispersión
4. Efecto de la superficie terrestre sobre la radiación
5. El balance de radiación
 - a. Radiaciones de longitud de onda corta
 - Radiación global (R_g)
 - Radiación directa (I)
 - b. Radiaciones de longitudes de onda larga
 - Radiación atmosférica (R_a)
 - Radiación terrestre (R_t)



6. Estimación de los diferentes términos del balance de radiación
7. Efectos biológicos de la radiación visible
8. Instrumentos para medir la radiación
9. Captación de la radiación según la cobertura vegetal



CONFERENCIA III

EVAPOTRANSPIRACION Y OTRAS TRANSFERENCIAS CONVECTIVAS

1. Terminología clásica
2. Conceptos recientes
3. Evapotranspiración y el balance de energía
 - a. Flujo de calor sensible (θ_s)
 - b. Flujo de calor latente (θ_L)
 - c. Flujo de calor en el suelo (θ_0)
4. Evapotranspiración (ET)
 - a. Evapotranspiración Potencial (ETP)
 - b. Evapotranspiración Máxima (ETM)
 - c. Evapotranspiración Real (ETR)
5. Aspectos bioclimáticos de la evapotranspiración
6. Medidas de la evapotranspiración
 - a. Lisímetros
 - b. Fórmulas climáticas

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

CURSO - TALLER

MODELOS DE PRODUCCION DE BIOMASA

OBJETIVO:

Exponer los aspectos teóricos de la modelización de índices de producción de biomasa y a la vez familiarizar al equipo de zonificación desarrollando un ejemplo práctico para una estación con calculadora.

1. Introducción
2. Producción de biomasa
 - a. Producción de biomasa bruta (Bg)
 - b. Producción de biomasa neta (Bn)
 - c. Velocidad máxima de producción de biomasa bruta (bgm)
 - d. Velocidad de respiración a bgm
 - e. Velocidad máxima de producción de biomasa neta (bnm)
 - f. Producción de biomasa neta
3. Rendimiento de los cultivos
4. Desarrollo con el equipo de zonificación de un ejemplo práctico con un cultivo.

100
100
100



**LA AGROCLIMATOLOGIA
EN LA PLANIFICACION AGROPECUARIA**

Oscar E. Rojas

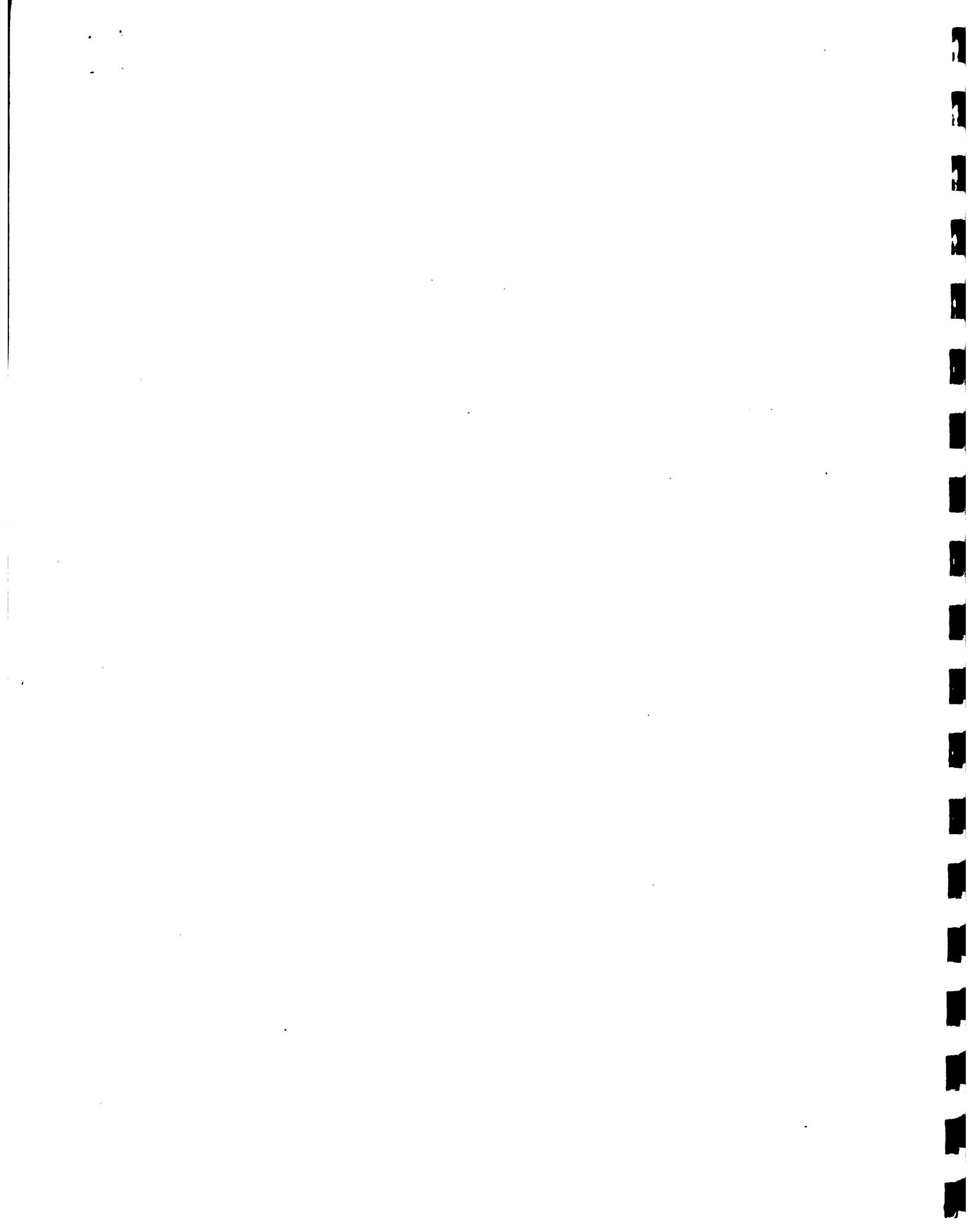
**SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO**

**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION
PARA LA AGRICULTURA**

IICA

SAN JOSE, COSTA RICA

Julio, 1987



**LA AGROCLIMATOLOGIA
EN LA PLANIFICACION AGROPECUARIA**

Oscar E. Rojas

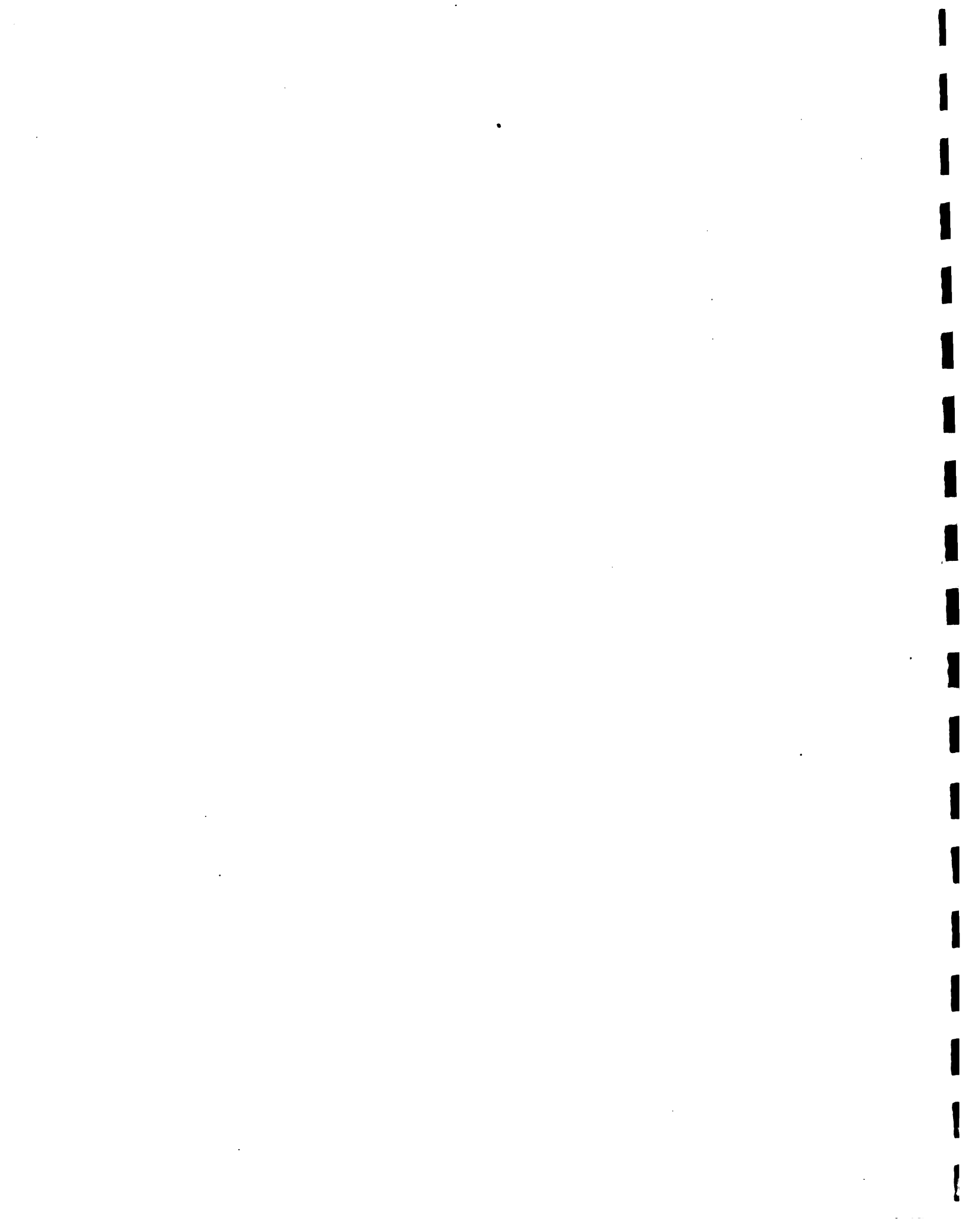
**SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO**

**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION
PARA LA AGRICULTURA**

IICA

SAN JOSE, COSTA RICA

Julio, 1987



CONTENIDO

	Página
ANTECEDENTES	1
ESTUDIO FRECUENCIAL DE LA PRECIPITACION CON RELACION A LA ETP	4
Determinación del período de cultivo	5
Resultados y discusión	5
BALANCE HIDRICO TEORICO	7
Ecuación del balance hídrico	7
Estudio de los riesgos de sequía y de exceso de agua	9
Resultados y discusión	9
Estudio de la diferencia de evapotranspiración	11
Resultados y discusión	14
ZONIFICACION AGROECOLOGICA DE CULTIVOS	14
BIBLIOGRAFIA	22



LA AGROCLIMATOLOGIA EN LA PLANIFICACION AGROPECUARIA

Oscar E. Rojas*

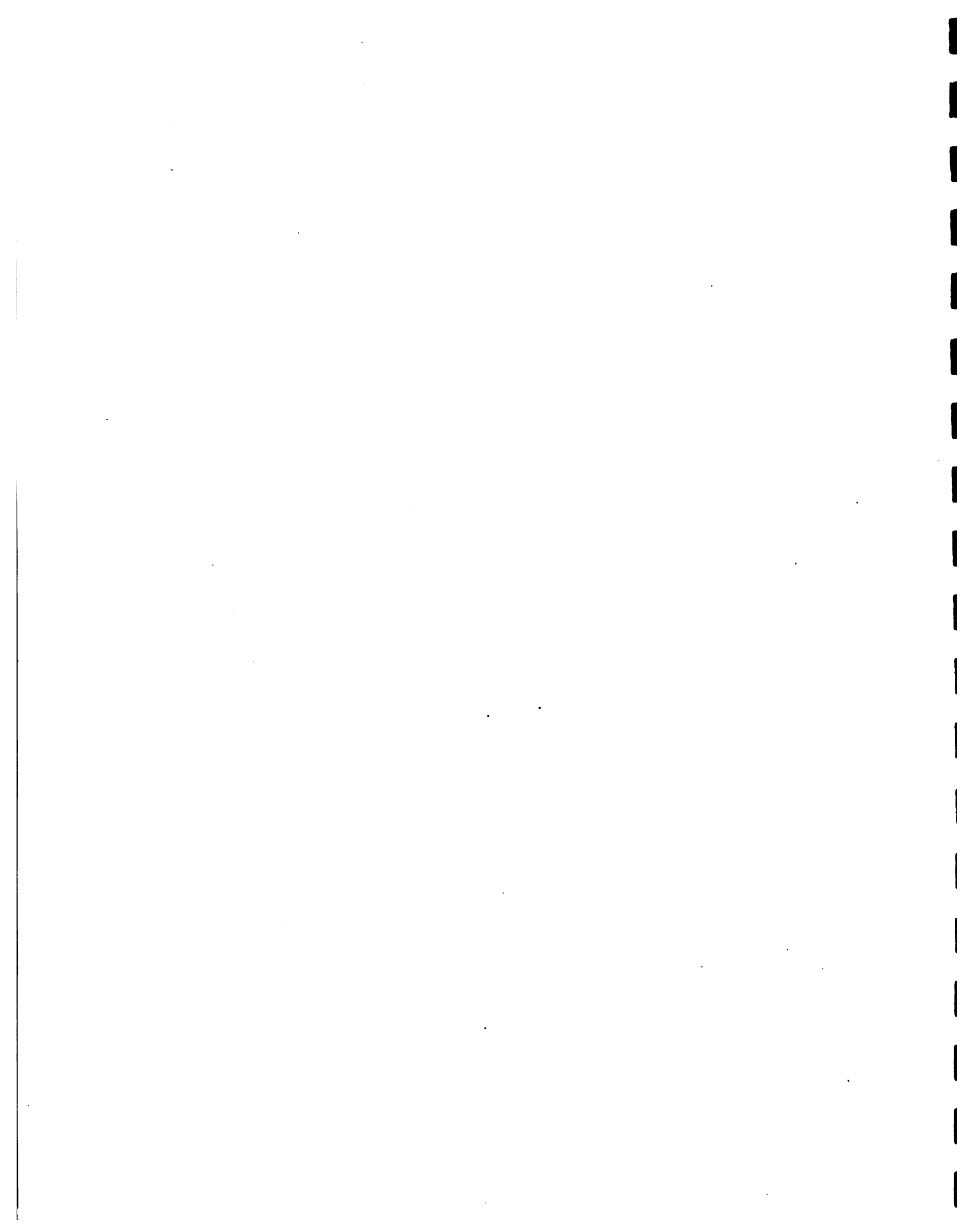
ANTECEDENTES

Desde tiempos inmemorables el agricultor se ha preocupado por la influencia del clima y del tiempo sobre el rendimiento final de su cosecha. Grandes esfuerzos se han hecho en el pasado para predecir el tiempo, partiendo de indicaciones y características diversas de la atmósfera.

La sequía, los vientos secos, la escarcha, las tormentas de lluvia, los huracanes, etc., han destruido frecuentemente las siembras y han causado la miseria generalizada de las poblaciones. En el curso de sus tentativas para predecir el tiempo del que dependía su bienestar, el agricultor ha hecho observaciones del viento, las nubes, la niebla, el relámpago, los fenómenos ópticos, la nieve y la escarcha, así como del sol, la luna, las estrellas, los ríos, los mares, la audibilidad del sonido, el movimiento del humo, etc.; también, ha observado el comportamiento de las plantas y de los animales.

En la primera mitad del Siglo XIX, en muchos periódicos aparecieron artículos sobre aspectos de la Agrometeorología y de la Climatología. Estos consistían, principalmente, en un examen sobre problemas del pronóstico del tiempo que partían de indicaciones distintas, incluyendo, además de las físicas, el comportamiento de los animales, especialmente los insectos y las condiciones de las plantas. Se acentuó la importancia de pronósticos precisos en agricultura y se hicieron tentativas para predecir los rendimientos de los cultivos.

* Ingeniero Agrónomo, D.A.A. Paris-Grignon. Consultor IICA-SEPSA en Agroclimatología y Zonificación de Cultivos.



Otro aspecto de estos artículos consistió en una investigación amplia de las condiciones climáticas en varias provincias, distritos y localidades y en la discusión sobre las condiciones de crecimiento, desarrollo y rendimiento de diferentes cultivos. Muchos de estos artículos son ensayos precisos sobre Climatología aplicada a la agricultura.

Nace de esta forma la Agroclimatología y la Agrometeorología, ciencias que tienen por objetivo primordial el estudio de las relaciones de intercambio que se dan entre el cultivo, la atmósfera (particularmente la capa en la cual crecen y se desarrollan las partes aéreas de las plantas), y el suelo (Figura 1). El origen de estas ciencias no puede atribuirse a un científico en particular, pues más bien se debe a los esfuerzos de muchos científicos y trabajadores prácticos. La Agroclimatología y la Agrometeorología no deben confundirse con la Meteorología General, ciencia ésta que se ocupa del estudio de la atmósfera como un todo y que tiene como una de sus principales tareas el pronóstico del tiempo.

Uno de los propósitos del análisis agroclimático es el de maximizar la productividad, mientras se minimiza el riesgo de pérdida en los cultivos debido a la variabilidad del clima.

Este análisis agroclimático se debe fundamentar en el estudio de los datos del clima para un período de 25 a 30 años, para analizar, no solamente el clima promedio, sino su variabilidad. Para que estos resultados sean útiles en la programación y planificación agropecuaria, se hace necesario que superemos la climatología clásica, que se contenta con caracterizar los estados promedios del clima, y que nos orientemos hacia un enfoque frecuencial de los fenómenos climáticos que afectan la agricultura.

Recientemente diversas instituciones de los sectores público y privado del país han adquirido conciencia de la necesidad de evaluar el potencial biofísico de las diferentes regiones así como de utilizar la zonificación



de cultivos como una herramienta de planificación para el fomento y desarrollo de las actividades del sector agropecuario. Conciente de esta preocupación, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) ha estado apoyando los esfuerzos que en esta materia realiza la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA) a través de su programa de zonificación agropecuaria.

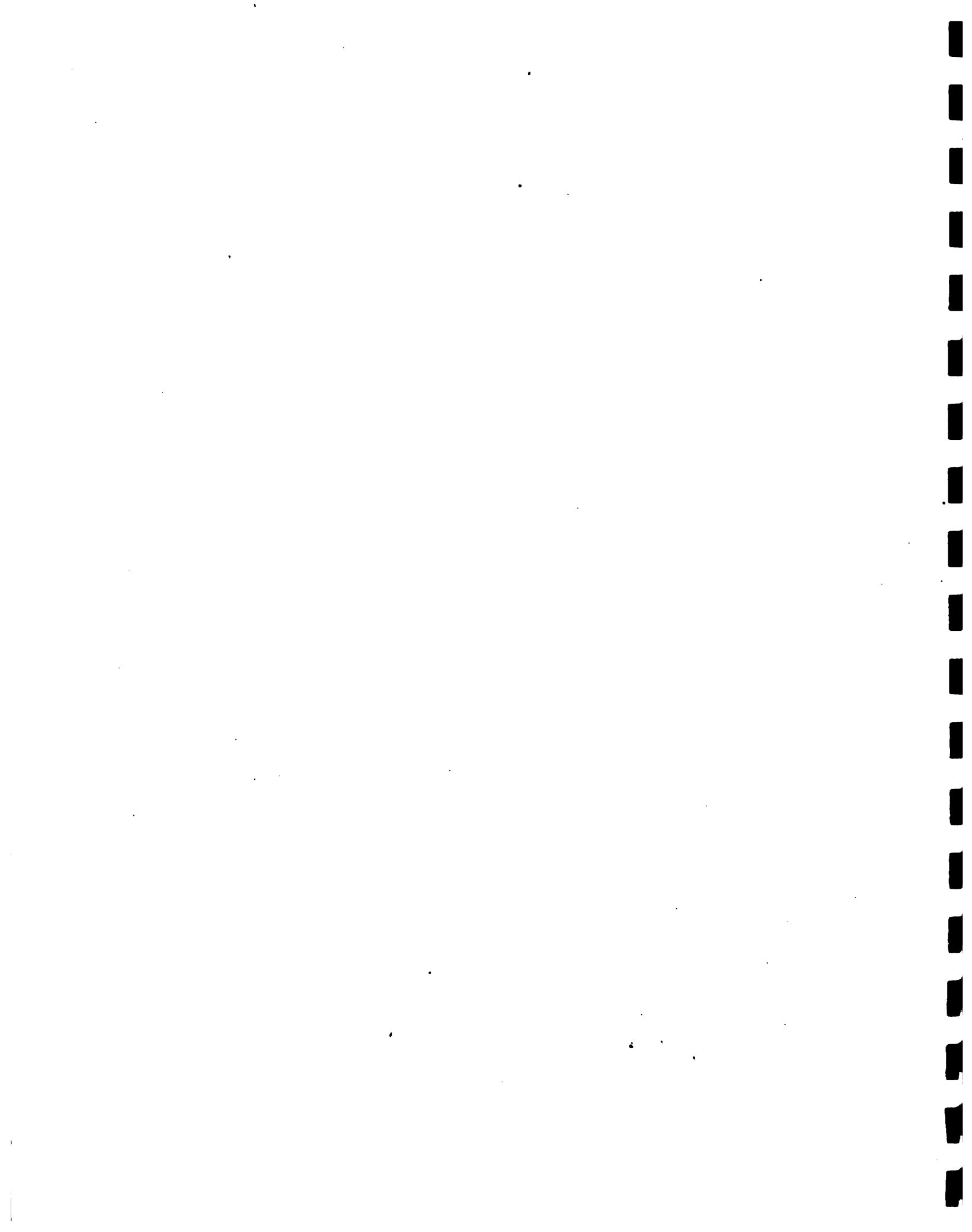
En los párrafos siguientes se presentan tres tipos de análisis agroclimáticos con el fin de ilustrar los alcances y usos de esta ciencia. Cada uno de estos análisis tiene niveles de precisión diferente que varían con los objetivos planteados y el problema abordado. Se espera que estas técnicas puedan ser incorporadas al esquema metodológico de zonificación de cultivos que emplea el equipo de zonificación de SEPSA.

A. ESTUDIO FRECUENCIAL DE LA PRECIPITACION CON RELACION A LA ETP

Este análisis tiene como objetivo primordial estudiar la distribución de la lluvia en el transcurso del año. En lugar de utilizar promedios, los cuales carecen de un verdadero significado, se emplean frecuencias. Estas introducen una noción de riesgo de interés para el agricultor.

La evapotranspiración potencial (ETP) representa aproximadamente el requisito óptimo en agua de un cultivo bien desarrollado y que cubre bien el suelo. Se puede considerar que la mitad de la evapotranspiración potencial (ETP/2) representa el requisito mínimo para obtener un rendimiento satisfactorio, pero no necesariamente óptimo.

La metodología de análisis consiste en dividir el año en períodos elementales de 10 días, denominados décadas. Para cada década se determinan las frecuencias de que la lluvia acumulada en el transcurso de estos 10 días sobrepase el valor de la evapotranspiración potencial y la mitad de la ETP.



Los resultados, es decir, las frecuencias para cada década, son representados en un gráfico cuya abscisa representa una escala de tiempo que abarca todo el año y graduada en décadas (36 décadas), y la ordenada una escala de frecuencia graduada de 0 a 1.

Determinación del período de cultivo

Las curvas obtenidas pueden ser utilizadas para determinar la época de cultivo (inicio, duración y fin), a un cierto nivel de probabilidad. Se escoge generalmente el valor de 0.75, que significa una frecuencia de ocurrencia del fenómeno de tres años cada cuatro y que corresponde a un riesgo aceptable en agricultura.

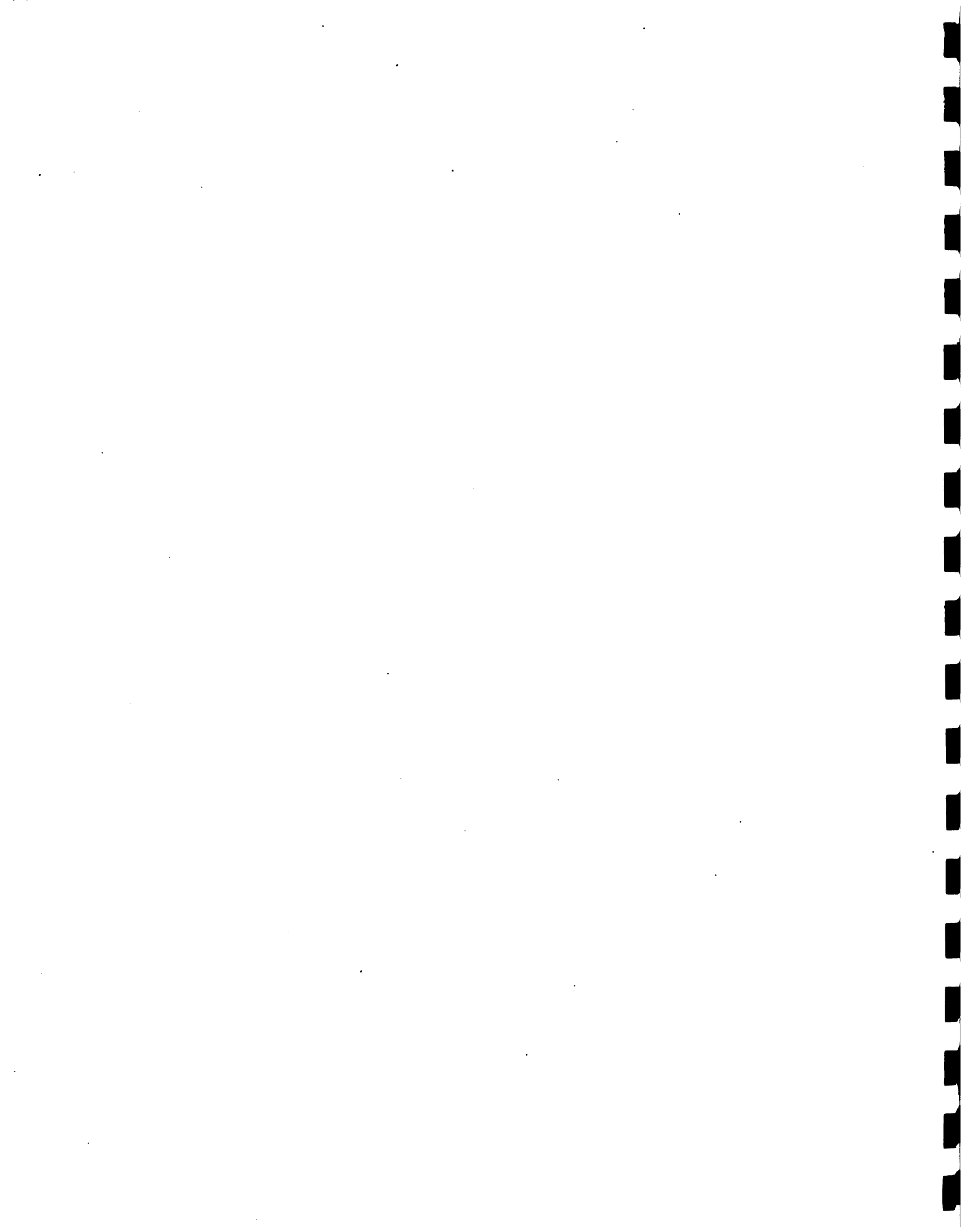
El período de cultivo comienza con la primera década, donde la frecuencia sobrepasa el valor de 0.75 y termina con la primera década con una frecuencia inferior a 0.75.

Si una década con una frecuencia inferior a 0.75 se encuentra entre dos décadas, con valor superior a 0.75, se considera que no hay interrupción del período de cultivo. Pueden aparecer evidentemente varios períodos de cultivo (generalmente no más de dos).

Para cada estación analizada se obtiene así la duración de la época de cultivo (o épocas de cultivo) y la fecha de inicio de esa época (o épocas). Si la red de estaciones es lo suficientemente densa, se pueden representar los resultados en un mapa por medio de un trazado de isolfneas.

Resultados y discusión

A manera de ejemplo, se presenta en la Figura 2 los resultados del análisis frecuencial de lluvias para la estación de Santa Cruz en el Pacífico Norte de Costa Rica. Para esta estación se determinaron dos períodos de cultivo a la probabilidad 0.75. De igual forma, se calcula la duración en días del período de cultivo, para 72 estaciones



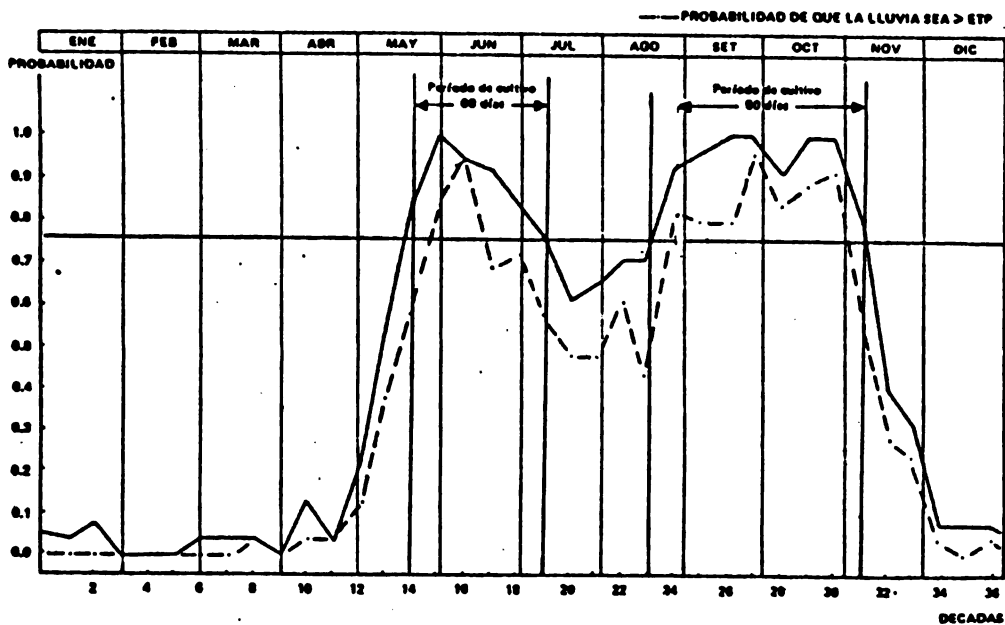
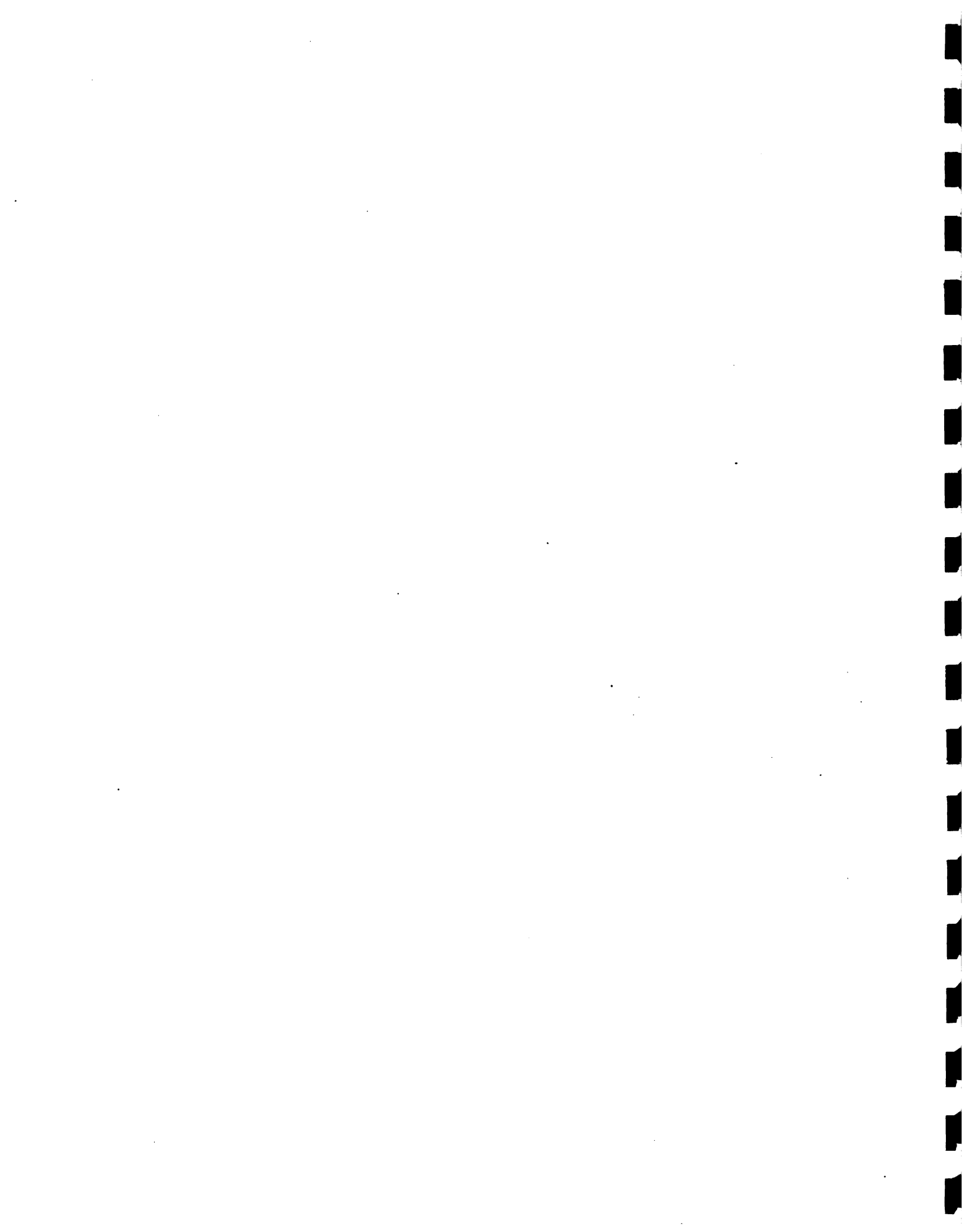


Fig. 2. Análisis frecuencial de lluvias para la estación Santa Cruz.



meteorológicas de Costa Rica, resultados a los cuales se les da expresión cartográfica (Mapa 1).

Se señala que la escala original del mapa es de 1:500 000. y además que varios períodos de cultivo resultan de la suma de dos períodos elementales como sucede en algunas estaciones del Pacífico Norte.

B. BALANCE HIDRICO TEORICO

Esta segunda técnica de análisis agroclimático, permite obtener una mejor aproximación a la realidad de las transferencias de agua que ocurren entre el suelo, el cultivo y la atmósfera (Lhomme, J.P., et. al., 1985; Rojas, O.E., 1984).

Se integran parámetros de ajustes de tipo edáfico (reserva útil) y del cultivo (coeficiente del cultivo), además el modelo simula la evolución de la reserva hídrica del suelo a nivel diario y es recurrente.

Este tipo de análisis deberá usarse cuando exista buena información meteorológica y cuando el problema abordado así lo requiera. Esto último por ejemplo, podría suceder al querer estudiar la participación del déficit hídrico en la antesis del cafeto.

Ecuación del balance hídrico

La ecuación que representa a nivel diario el balance hídrico se escribe:

$$RH_j = RH_{j-1} + PE_j - ETR_j - D_j$$

donde:

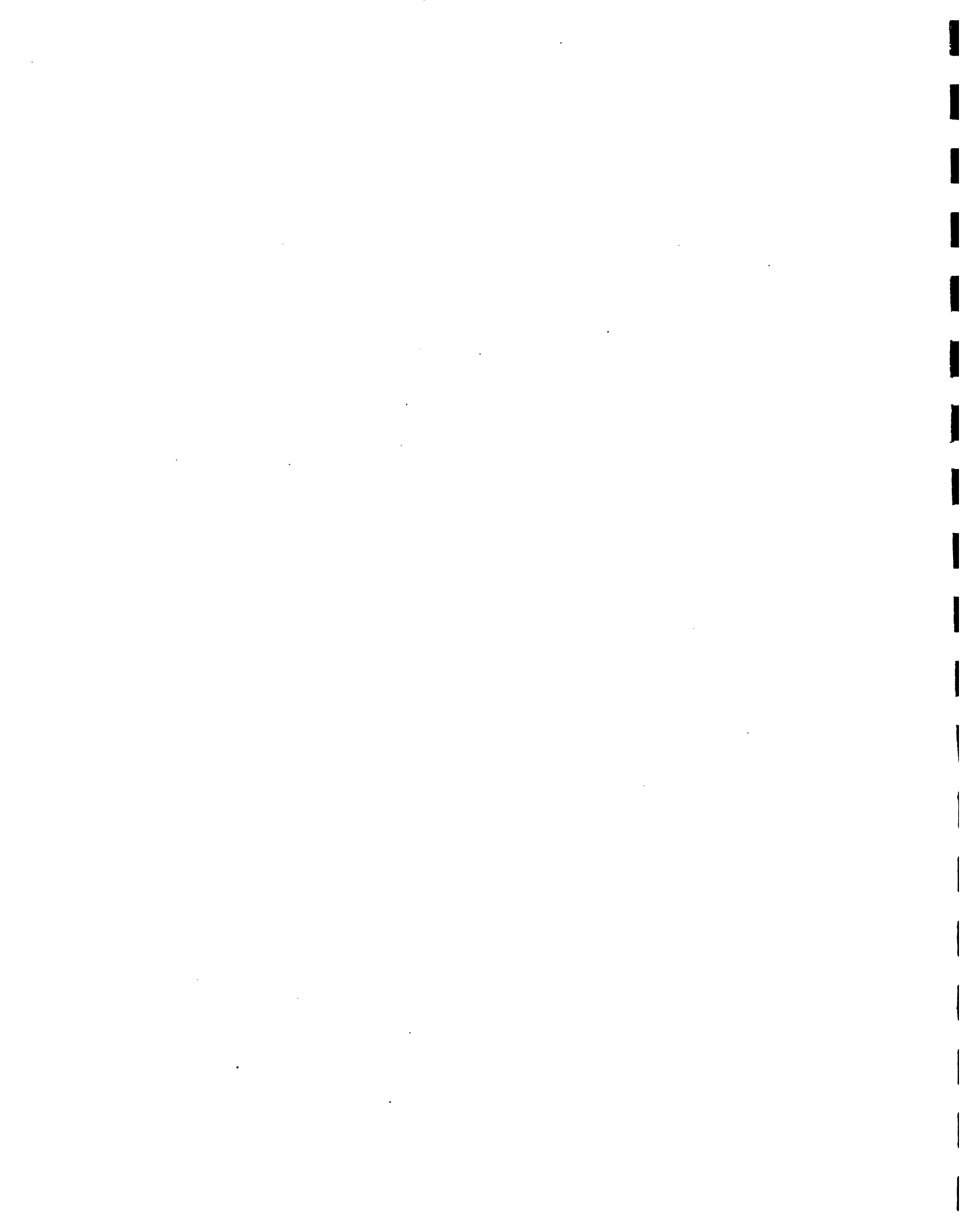
RH_j = Valor de la reserva hídrica del suelo el día j

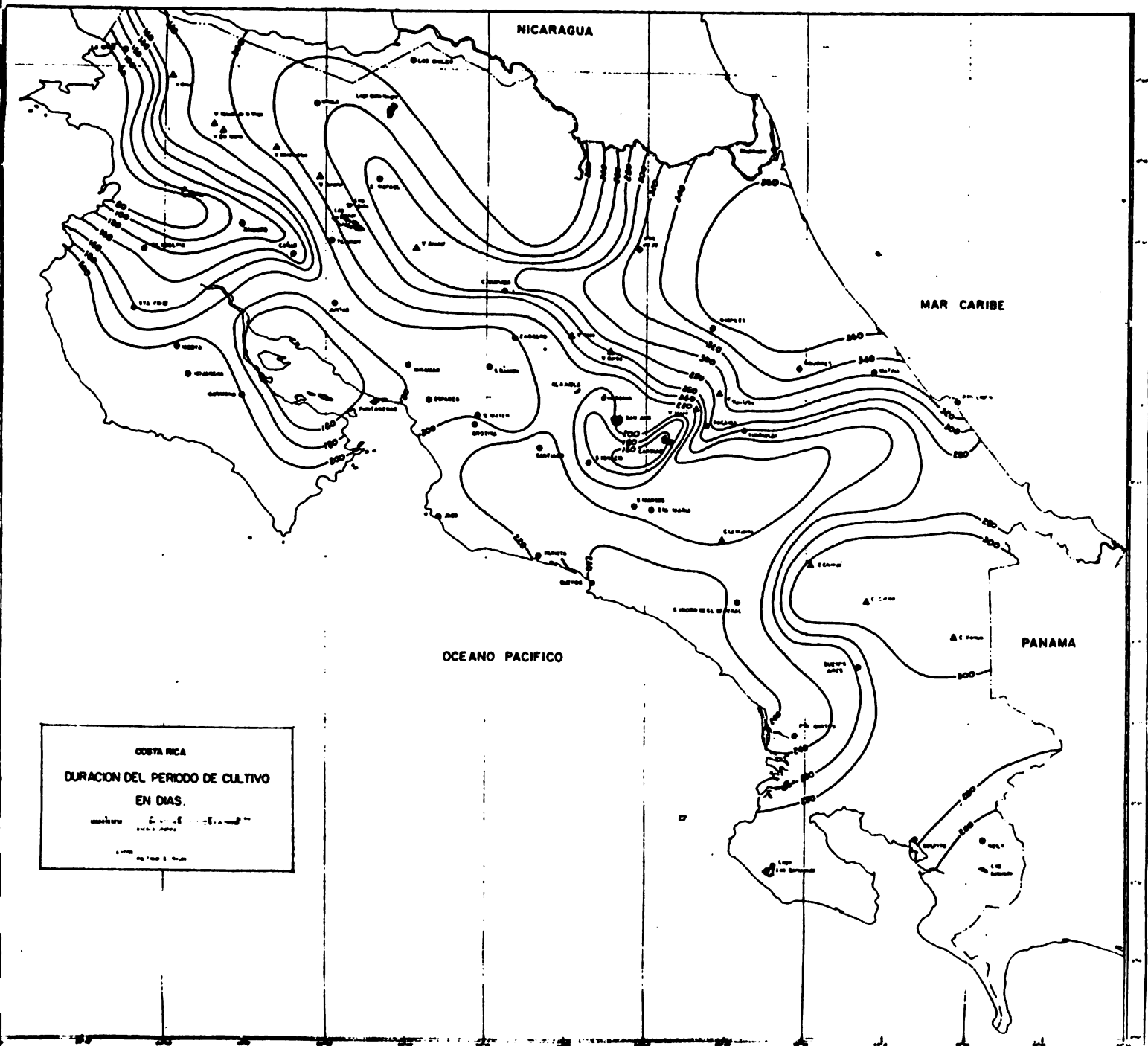
RH_{j-1} = Valor de la reserva hídrica del suelo al día $j-1$

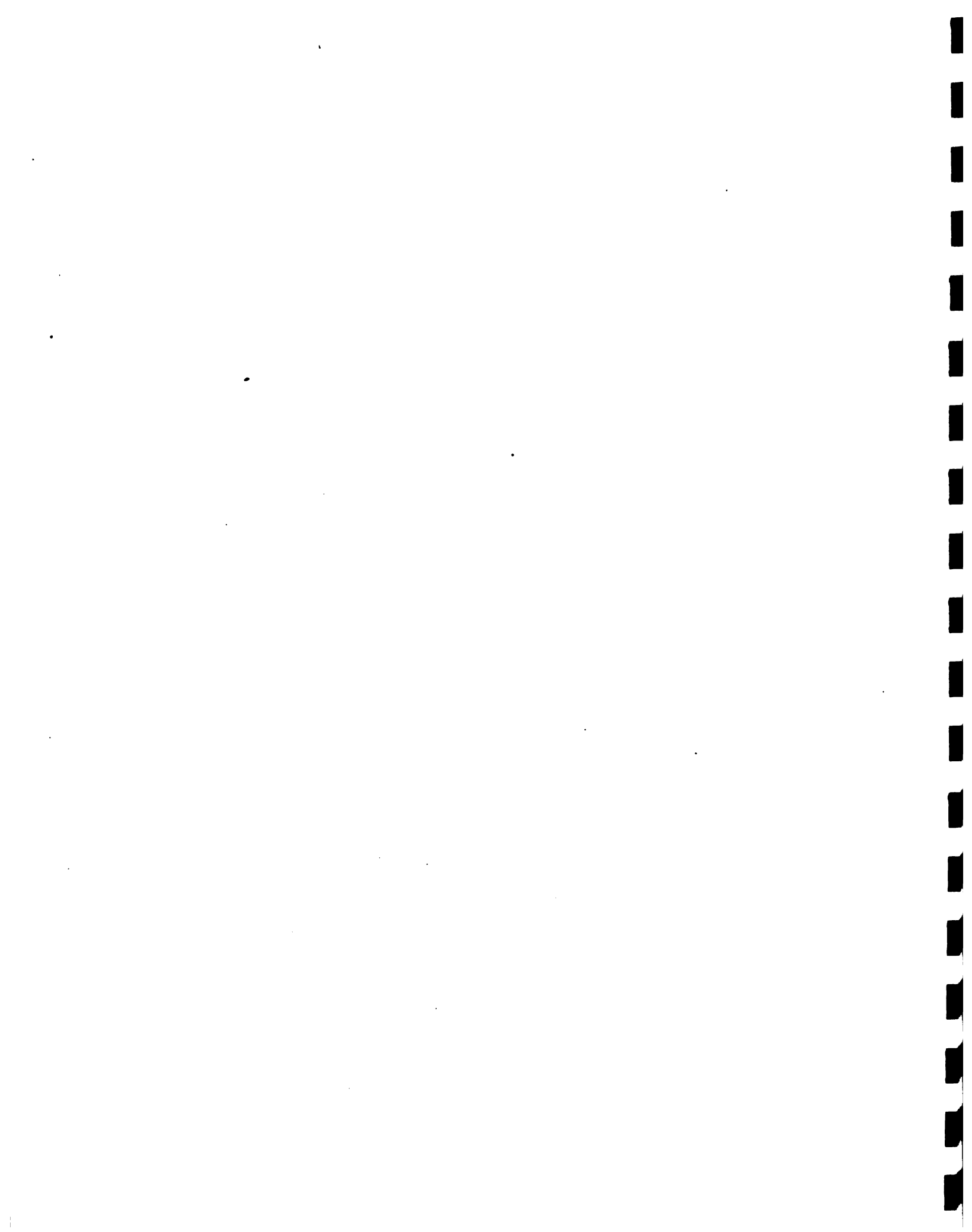
PE_j = Precipitación pluvial eficaz el día j

ETR_j = Evapotranspiración real del día j

D_j = Drenaje del día j







Esta ecuación va a servir como relación recurrente para calcular las reservas hídricas sucesivas. A menos de que se tenga una manera particular de conocer la reserva hídrica al inicio del proceso recurrente, R_{Ho} , se puede basar en las consideraciones siguientes para iniciar el proceso: si el día 1 se encuentra en medio de la estación seca, se escoge $R_{Ho} = 0$, y si se encuentra en medio de la estación lluviosa, $R_{Ho} = RU$; de lo contrario, se toma un valor promedio $R_{Ho} = RU/2$. Como salida ("output") del modelo se obtiene una matriz que puede contener: 1) las reservas hídricas diarias; 2) déficits hídricos diarios ($ETM - ETR$) y; 3) los valores diarios del drenaje.

Estudio de los riesgos de sequía y de exceso de agua

Para el análisis de los riesgos de sequía se utiliza la matriz con los datos de las reservas hídricas diarias. Se define un día seco como un día con una reserva hídrica inferior a la reserva difícilmente utilizable (RDU). A partir de esto se calcula la ocurrencia de 5, 10, 15, ... n días consecutivos secos, cuyos resultados pueden ser representados en forma gráfica por década.

Si el interés del estudio fuera evaluar la duración del período seco, se calcula para cada año de registro el número máximo de días consecutivos secos y se procede a calcular su frecuencia de ocurrencia interanual. De igual forma, se puede estudiar los excesos hídricos utilizando para esto la matriz con los valores diarios del drenaje.

Resultados y discusión

En la Figura 3, se presentan los resultados por década, de obtener 5 y 10 días consecutivos secos para el cantón de Acosta en el Pacífico Central de Costa Rica. Se aprecia un pequeño aumento de las frecuencias en los meses de julio y agosto pertenecientes a la época lluviosa lo cual podría incidir negativamente en el desarrollo de algunos cultivos de la región, por ejemplo, el maíz que se encuentra entre los



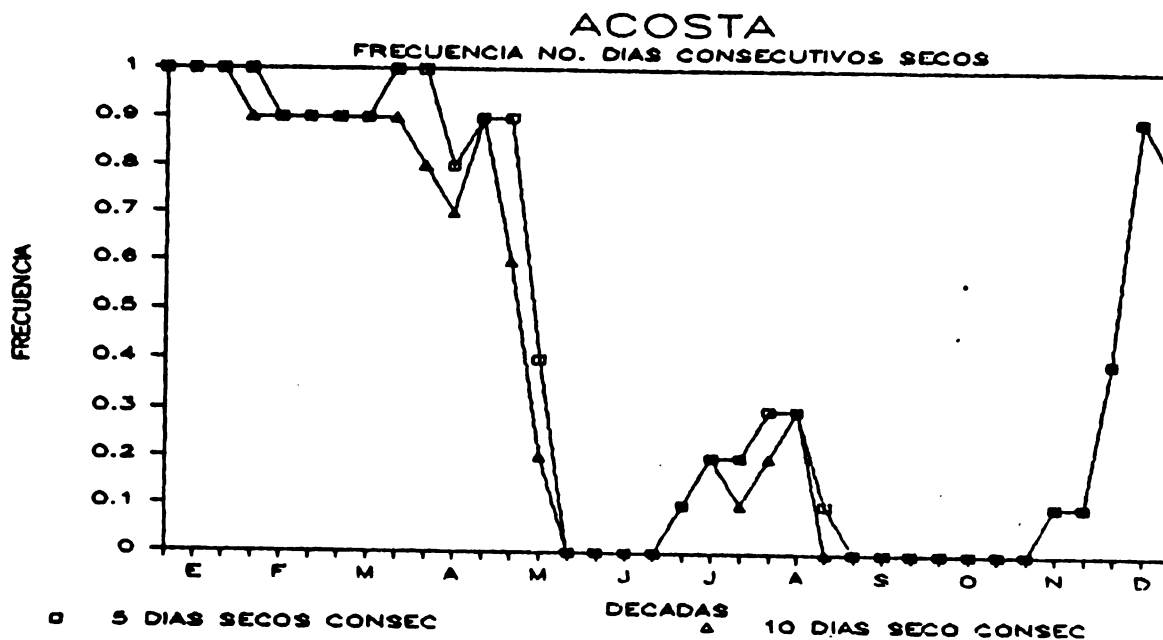


FIGURA 3 Frecuencia del número de días consecutivos secos para la estación de Acosta.

Cuadro 1

Parámetros estadísticos del número de días consecutivos secos
para la región del Pacífico Norte

ESTACION	MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	77	154	169	188	195	166	29	0,18
Filadelfia	133	155	174	186	200	170	19	0,11
Liberia	120	137	174	187	202	165	26	0,16
Nicoya	85	121	152	164	171	145	23	0,16
Puntarenas	96	132	170	182	192	158	28	0,18
Quebrada Grande	89	135	155	174	281	158	37	0,23
Santa Cruz	90	131	169	175	200	159	27	0,17
Taboga	88	109	147	171	177	142	29	0,21
Tilarán	70	104	131	153	169	127	27	0,21



principales. En relación a la duración del período seco se presentan los resultados de nueve estaciones meteorológicas ubicadas en el Pacífico Norte de Costa Rica; se aprecia en el Cuadro 1, que en promedio, se pueden esperar para la región como mínimo, 127 días consecutivos secos ($RH < RDU$) en Tilarán y como máximo 170 días en Filadelfia.

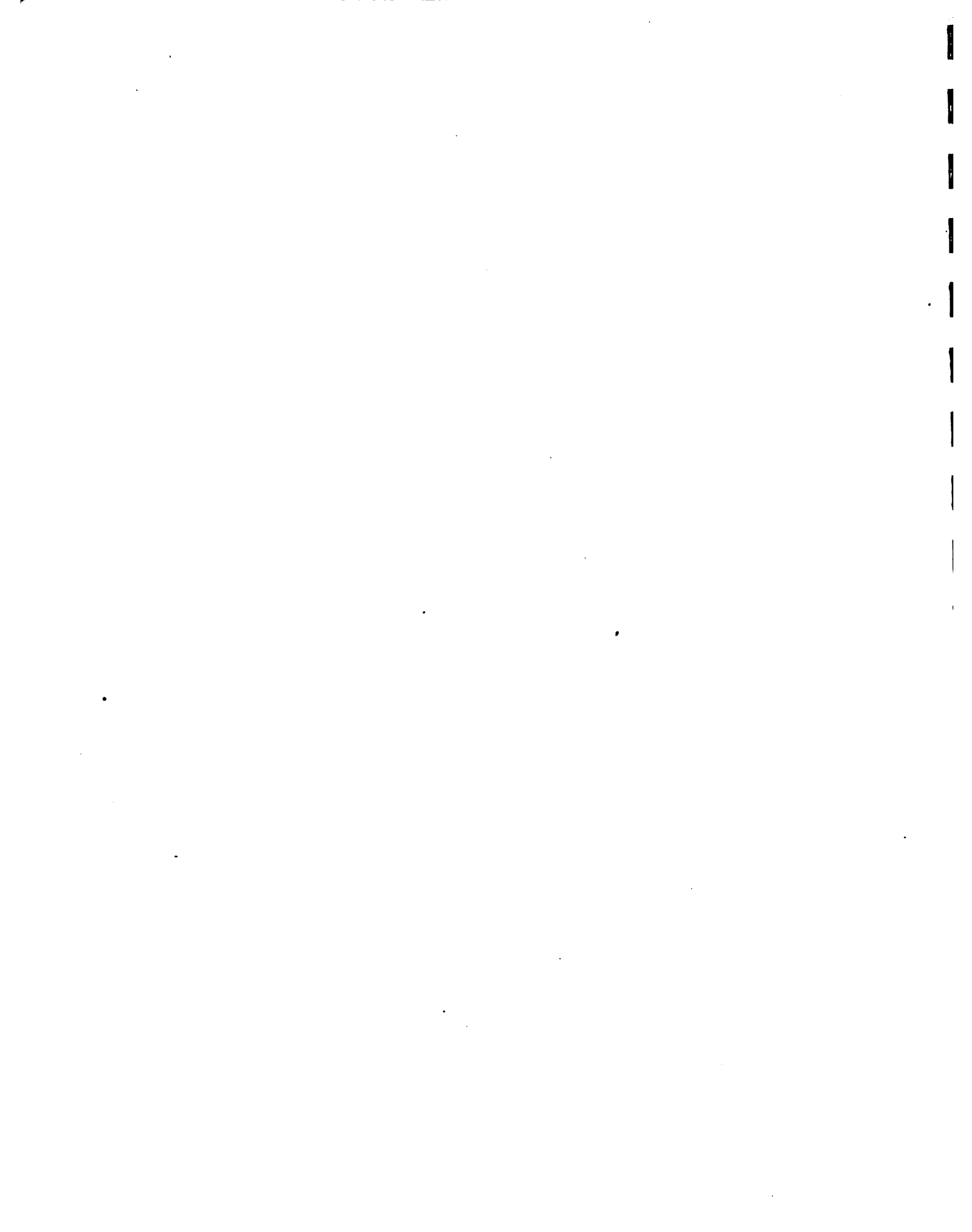
Con una probabilidad de 80% de que ocurran al menos 104 días consecutivos secos en Tilarán y 155 en Filadelfia. Por otra parte, si se analizan los resultados del Cuadro 2, donde se presentan los parámetros estadísticos de los días consecutivos secos que se dan en medio de la época lluviosa por efecto de la canícula, se aprecia que pueden ocurrir 7 días secos consecutivos en Tilarán y 21 días como máximo en Cañas (zona más afectada por este fenómeno meteorológico).

Estudio de la diferencia de evapotranspiración

A partir de la matriz que contiene los valores diarios de la diferencia entre ETM y ETR, que puede considerarse como un déficit hídrico a nivel del cultivo, se estudia el impacto de la sequía sobre el rendimiento esperado. Esta diferencia de evapotranspiración se considera como índice de sequía por la relación estrecha que guarda con la producción de materia seca (Figura 4).

Cuando el suelo se encuentra insuficientemente provisionado de agua, o la planta es fisiológicamente incapaz de asegurar el gasto de agua resultante de la demanda climática, el régimen de evapotranspiración máxima (ETM) no se alcanza y la planta se encuentra en régimen de evapotranspiración real (ETR) que es menor que ETM ($ETR < ETM$).

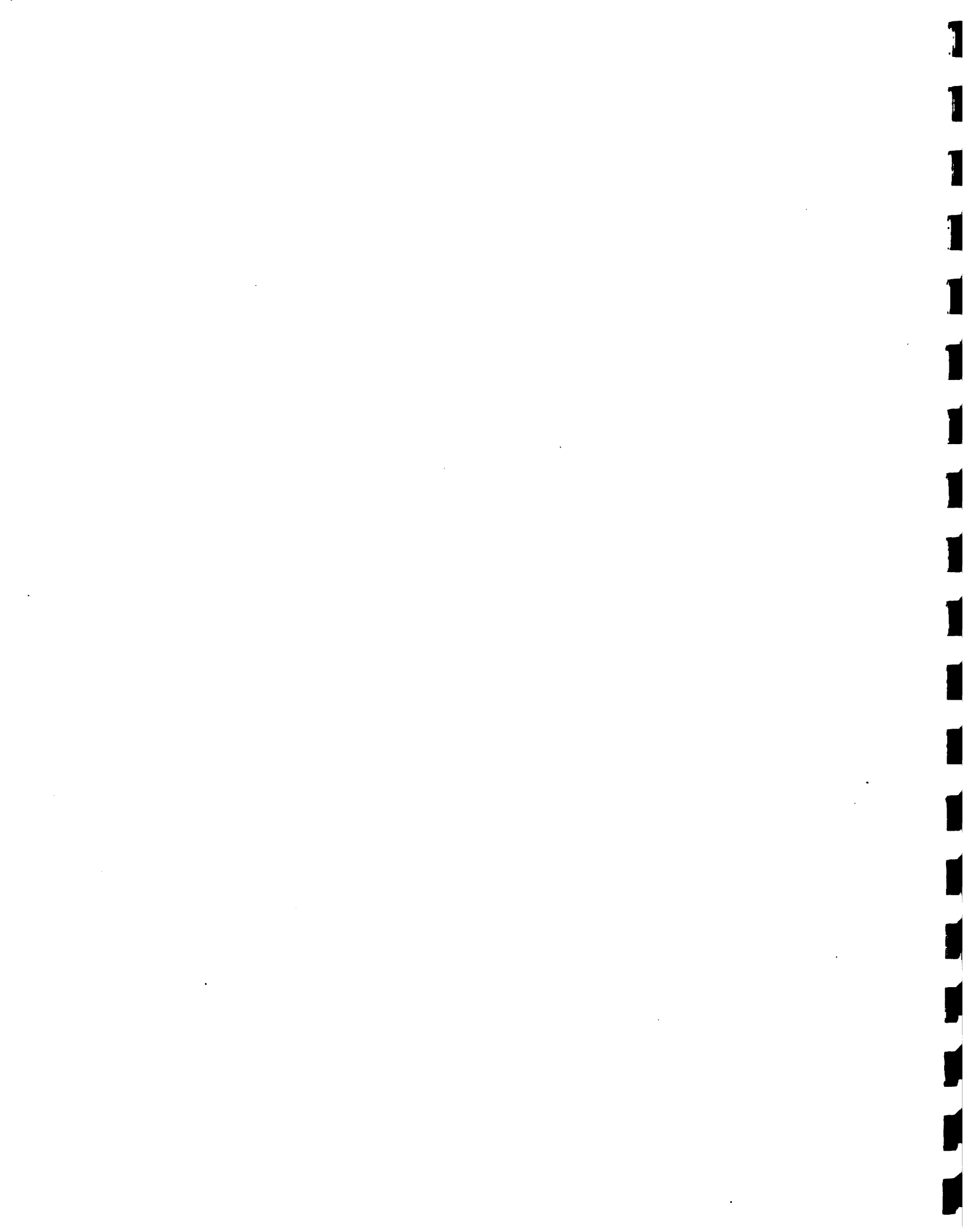
El cierre parcial de los estomas reduce el intercambio gaseoso de la planta con la atmósfera y frena su actividad fotosintética. Se admite generalmente que para una especie dada, la reducción de los flujos



Cuadro 2

Parámetros estadísticos del número de días consecutivos secos
dentro del "veranillo" para la región del Pacífico Norte

ESTACION	MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	0	0	22	38	46	21	16	0,77
Filadelfia	0	4	13	20	33	12	9	0,76
Liberia	0	7	14	18	66	17	17	1,01
Nicoya	0	0	2	9	26	5	7	1,38
Puntarenas	0	5	18	29	56	19	14	0,74
Quebrada Grande	0	0	9	19	75	14	21	1,47
Santa Cruz	0	0	13	25	54	15	14	0,92
Taboga	3	3	13	36	39	18	14	0,78
Tilarán	0	0	3	19	23	7	9	1,23



CUADRO 3 PARAMETROS ESTADISTICOS DE LA DIFERENCIA ABSOLUTA DE EVAPOTRANSPIRACION (ETM - ETR) POR DECADE PARA LA ESTACION NICOYA CON RU = 100 mm

MINI	AN	Q=TI	REDN	JMIA	BACI	AN	RED	E-T	CO-VA
157	77	JJ1	436	460	470	83	407	79	3.13
263	93	404	448	457	453	93	407	53	0.12
421	90	470	515	510	510	98	407	25	0.05
502	90	520	530	530	530	98	407	8	0.01
445	92	34	550	550	550	98	407	27	0.05
280	87	447	570	570	570	98	407	85	0.16
337	89	464	570	570	570	98	407	67	0.13
40	88	467	560	560	560	98	407	135	0.27
83	82	460	550	549	550	98	407	123	0.27
84	86	378	533	550	570	98	407	133	0.30
180	89	474	527	561	580	98	407	98	0.20
128	83	241	380	481	530	77	407	122	0.33
0	84	45	214	330	421	81	407	111	0.65
0	73	0	87	187	372	33	407	106	1.28
0	77	0	0	80	318	98	407	85	2.10
0	77	0	0	0	74	33	407	21	2.83
0	77	0	0	0	0	98	407	0	3.83
0	77	0	0	0	79	90	407	18	3.83
0	77	0	0	0	224	33	407	53	2.87
0	77	0	0	28	118	74	407	10	2.01
0	77	0	0	25	95	33	407	23	1.89
0	77	0	0	17	142	90	407	31	2.74
0	77	0	0	0	162	97	407	38	3.29
0	77	0	0	0	13	98	407	1	8.12
0	77	0	0	0	0	98	407	0	8.12
0	77	0	0	0	0	98	407	0	8.12
0	77	0	0	0	0	98	407	0	8.12
0	77	0	0	0	0	98	407	0	8.12
0	77	0	0	0	0	98	407	0	8.12
0	77	0	0	6	45	78	407	11	2.28
0	77	0	0	88	233	32	407	58	1.44
0	83	14	89	166	328	92	407	95	0.95
6	80	105	222	297	337	92	407	105	0.50
87	87	237	335	378	420	92	407	112	0.38
245	77	322	411	427	444	73	407	60	0.15

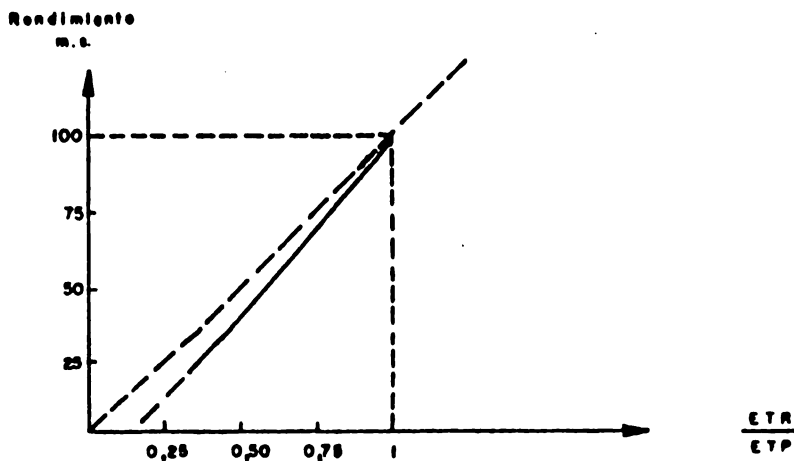


Fig. 4 - Relación entre el rendimiento en materia seca y la relación ETR/ETP (Robelin, 1967).



de vapor de agua y de gas carbónico es sensiblemente la misma, resulta pues, que los fenómenos de evapotranspiración y de fotosíntesis aparecen como proporcionales, ésto es:

$$\frac{MS_0 - MS}{MS_0} = \frac{EIM - ETR}{EIM}$$

con:

MS_0 = Producción de materia seca a nivel de ETM

MS = Producción de materia seca a nivel de ETR

Por esto se justifica el interés de estudiar esta diferencia de evapotranspiración tanto en forma absoluta (ETM-ETR), como relativa en porcentaje (ETM-ETR)/ETM x 100.

Resultados y discusión

Los resultados de la diferencia en evapotranspiración pueden presentarse en forma de cuadros (Cuadro 3) o en forma gráfica.

En la Figura 5 se aprecia que en términos del cuarto quintil, en medio de la estación lluviosa en Acosta, puede ocurrir una reducción de hasta un 20 por ciento en la producción de materia seca, debido al cierre estomático provocado por la disminución de las precipitaciones.

C. ZONIFICACION AGROECOLOGICA DE CULTIVOS

La tercera técnica seleccionada como ejemplo, se refiere a la zonificación agroecológica de cultivos. Con ella se integra el análisis agroecológico al análisis fisioedáfico con el fin de determinar zonas que desde el punto de vista ecológico, presenten un potencial agrícola.



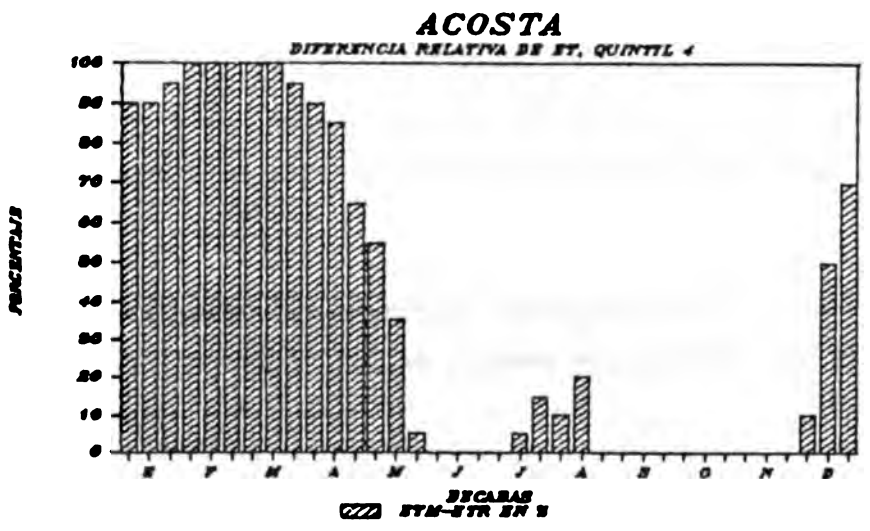
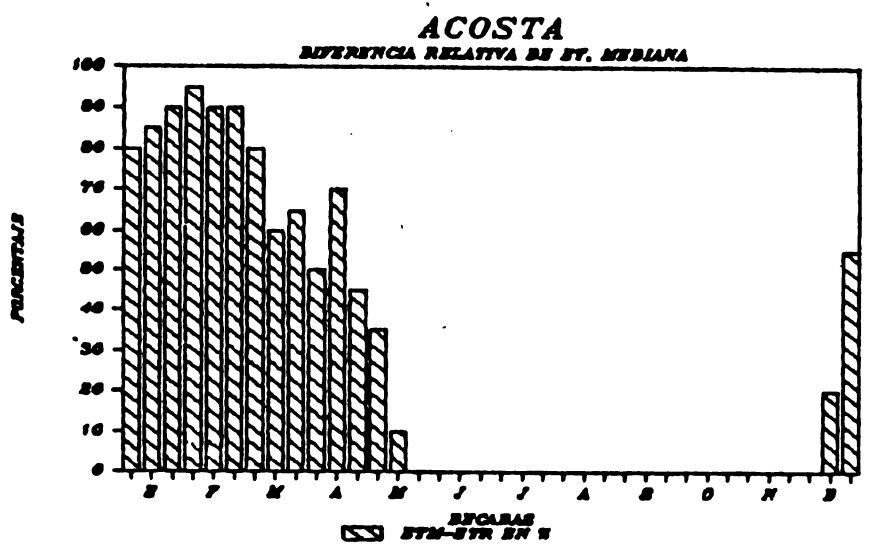
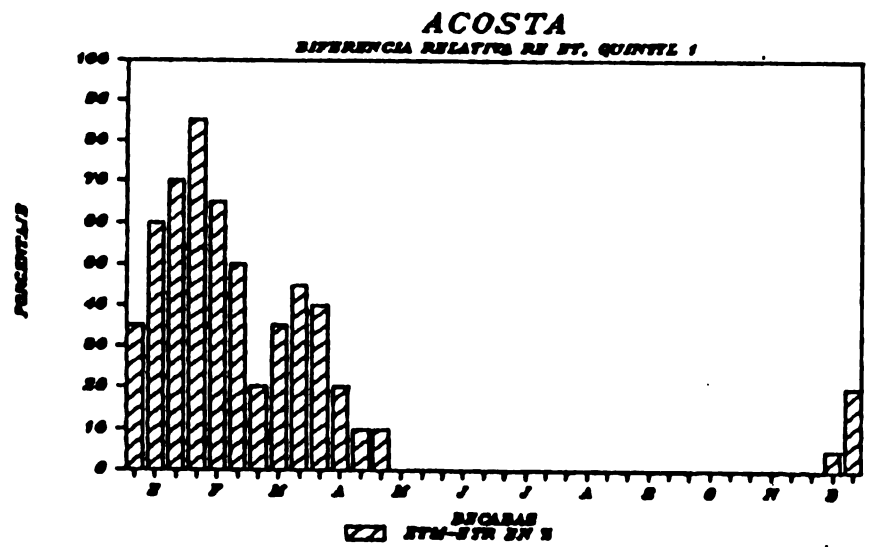
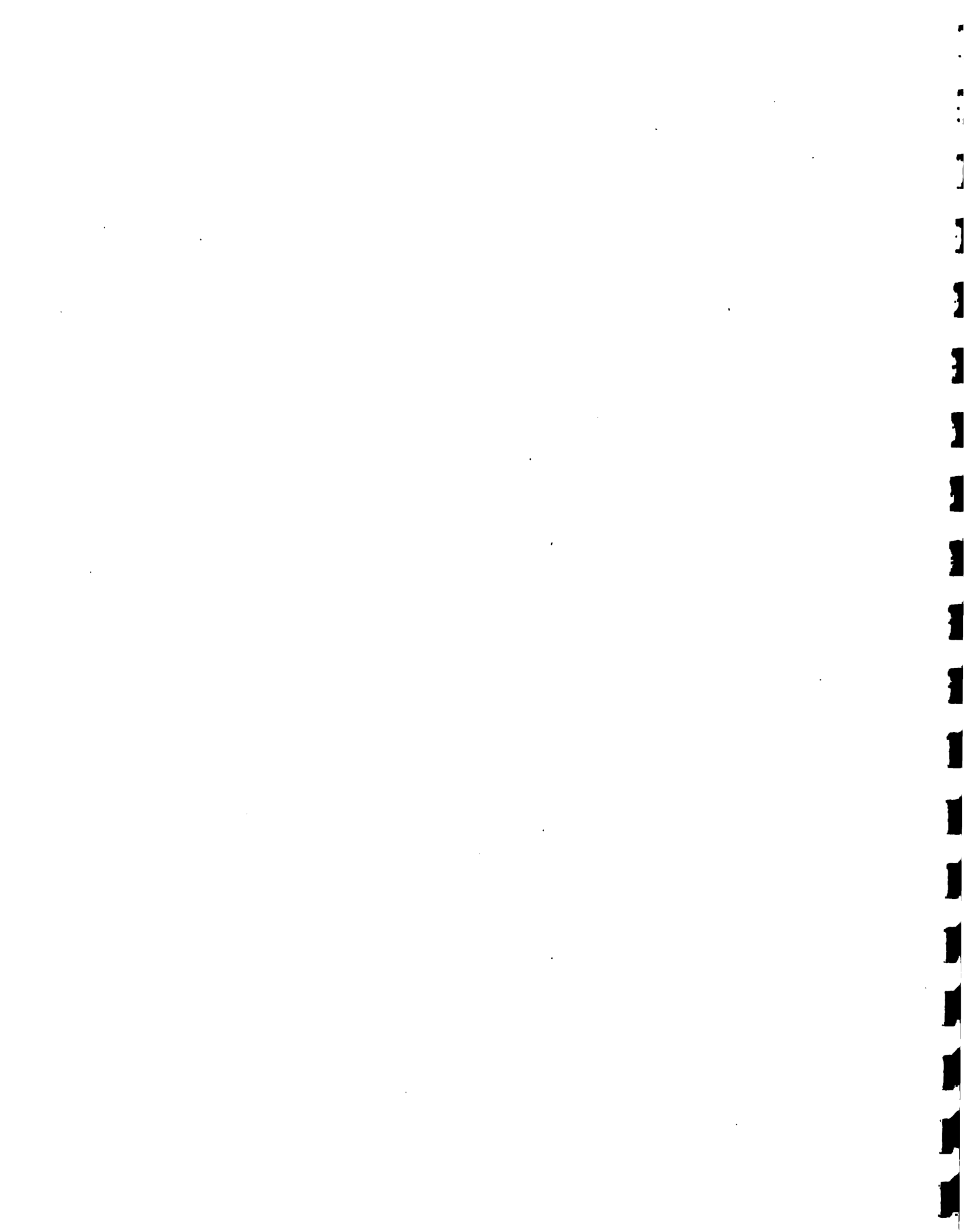


FIGURA 5 Diferencia relativa de la evapotranspiración para la estación de Acosta.



Para percibir la importancia de la zonificación agroecológica de cultivos bastará hacer un breve análisis de algunas necesidades que se encuentran en la elaboración de planes de proyectos de desarrollo agropecuario, en cualquiera de sus niveles jerárquicos: nacional, regional o de área específica. El punto de partida es el análisis económico de los productos agropecuarios que se encuentran deficitarios, la balanza del mercado internacional y perspectivas de exportación de los mismos. Como resultado del diagnóstico de mercados se pueden elaborar listas de productos que tienen buenas perspectivas económicas para una expansión.

Sin embargo, no basta establecimiento de estas listas de cultivos para poder hacer planes de fomento; la primera integrante que se plantearán los planificadores será sobre la localización de las áreas, que tengan condiciones ecológicas, adecuadas para estos cultivos; así se podrán formular las directrices necesarias para alcanzar las metas de expansión con una mayor seguridad y; por lo tanto, garantía del retorno de las inversiones.

Un segundo caso se refiere a planes de producción en áreas específicas, a este nivel es necesario determinar cuáles son los cultivos que tienen las mejores perspectivas ecológicas, en función de los recursos biofísicos disponibles en el área. De ahí la utilidad de la zonificación para los planificadores que necesitan de la lista de los cultivos ecológicamente factibles, de la determinación de los espacios geográficos con recursos ecológicos adecuados para cada uno de ellos y el costo y mercado de productos, etc., como elementos indispensables para la toma de decisiones relativas a que cultivo fomentar.

En los años 70, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura desarrolló un esquema metodológico de zonificación de

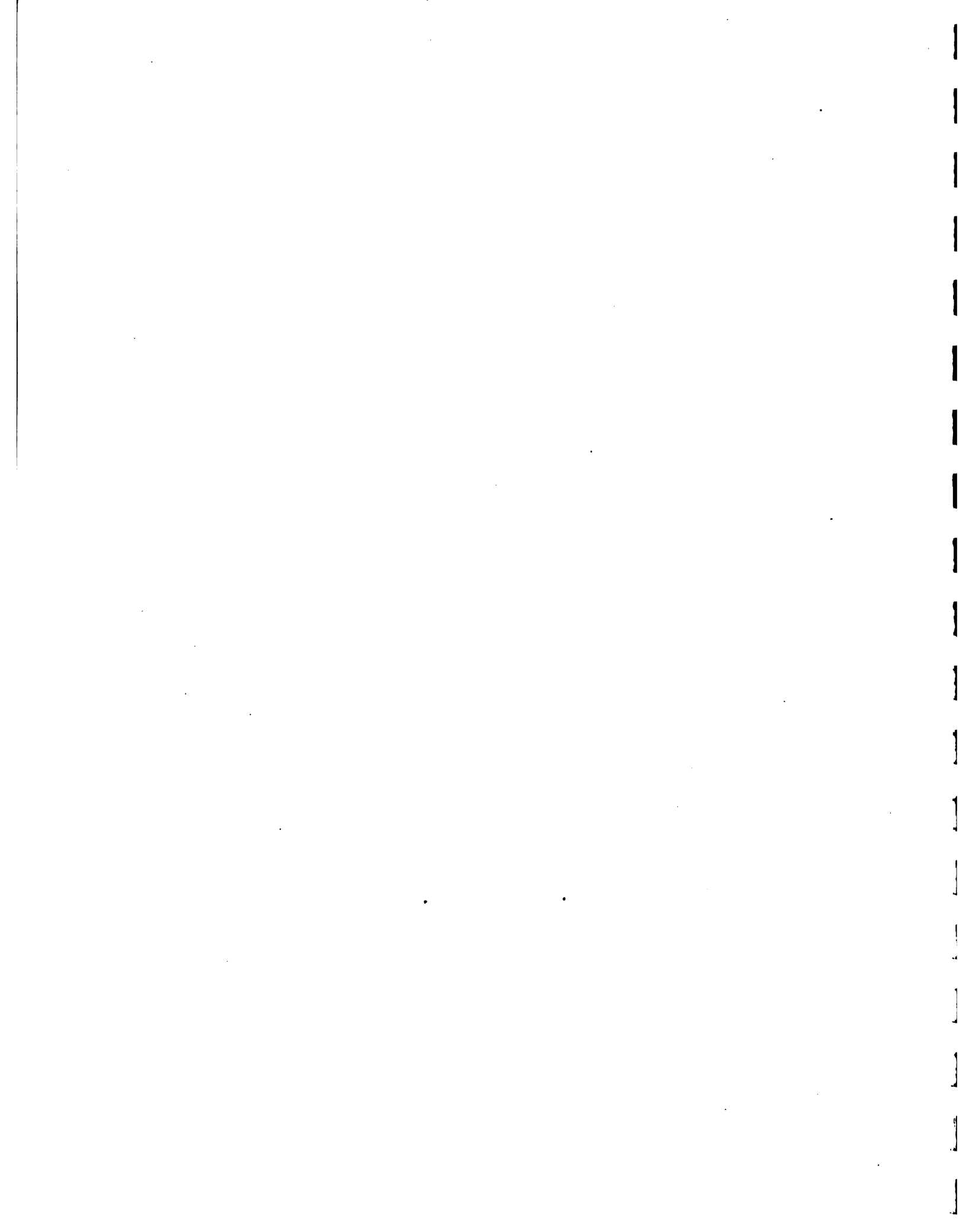


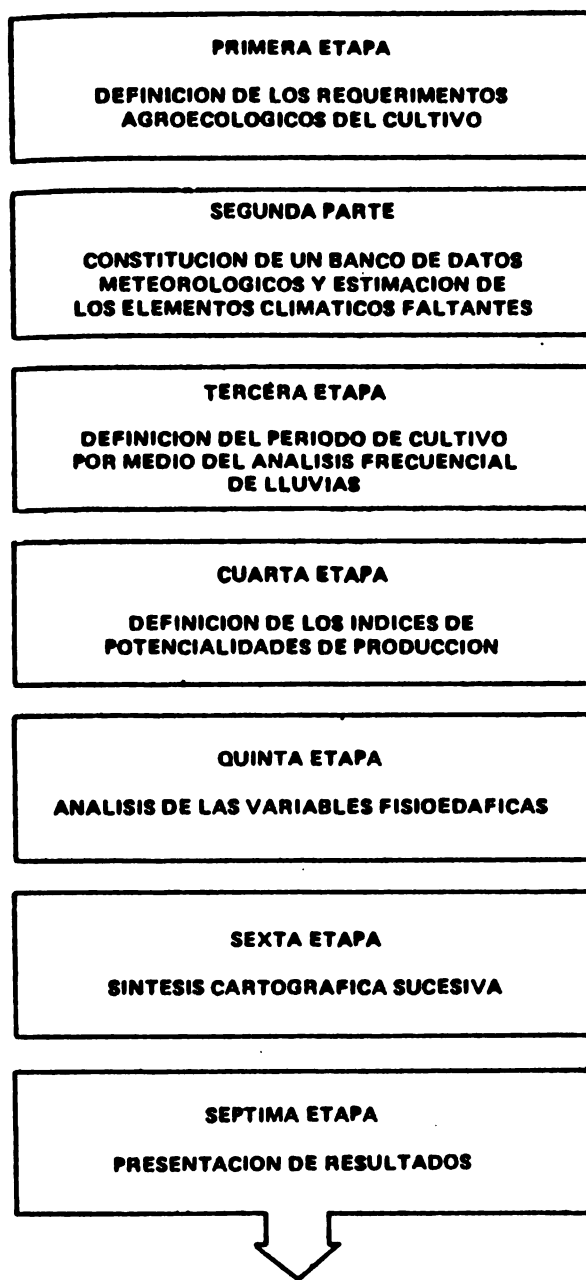
cultivos. Este esquema fue revisado y modificado a principios de los años 80; las etapas que comprende en la actualidad este esquema, se presentan en la Figura 6.

Se utiliza la técnica anteriormente descrita del análisis frecuencial de lluvias, para definir la duración del período de cultivo. Durante este período de cultivo se integra una función de producción de biomasa (ROJAS, O. y ELDIN, M., 1983). El modelo empleado introduce las leyes de física en los procesos biológicos que rigen la producción vegetal: fotosíntesis, respiración, evapotranspiración, etc. De manera, que se tendrá más oportunidad de lograr una zonificación válida para zonas ecológicas bien diferentes. A los resultados obtenidos se le da expresión cartográfica (Mapa 2). De igual forma se procede, si es necesario integrar otra función que relacione las variables del clima con el rendimiento final del cultivo en estudio.

A partir del conocimiento de los requerimientos edáficos y de las prácticas culturales más aconsejables (riego, mecanización, etc.) para el cultivo determinadas en la primera etapa, se analiza la información disponible sobre aspectos topográficos y edáficos del territorio a zonificar. Una vez que se obtienen los diferentes mapas (índice de producción potencial, índice sobre el rendimiento final y variables fisioedáficas) se procede a hacer la síntesis cartográfica. Esto último consiste en la sobreposición y síntesis de los mapas elaborados. Se discriminan aquellas áreas del territorio que no son contempladas por los mapas de índices agroclimáticos o por el mapa de las variables fisioedáficas. Se esta manera se obtiene la zonificación agroecológica del cultivo en estudio (Mapa 3).

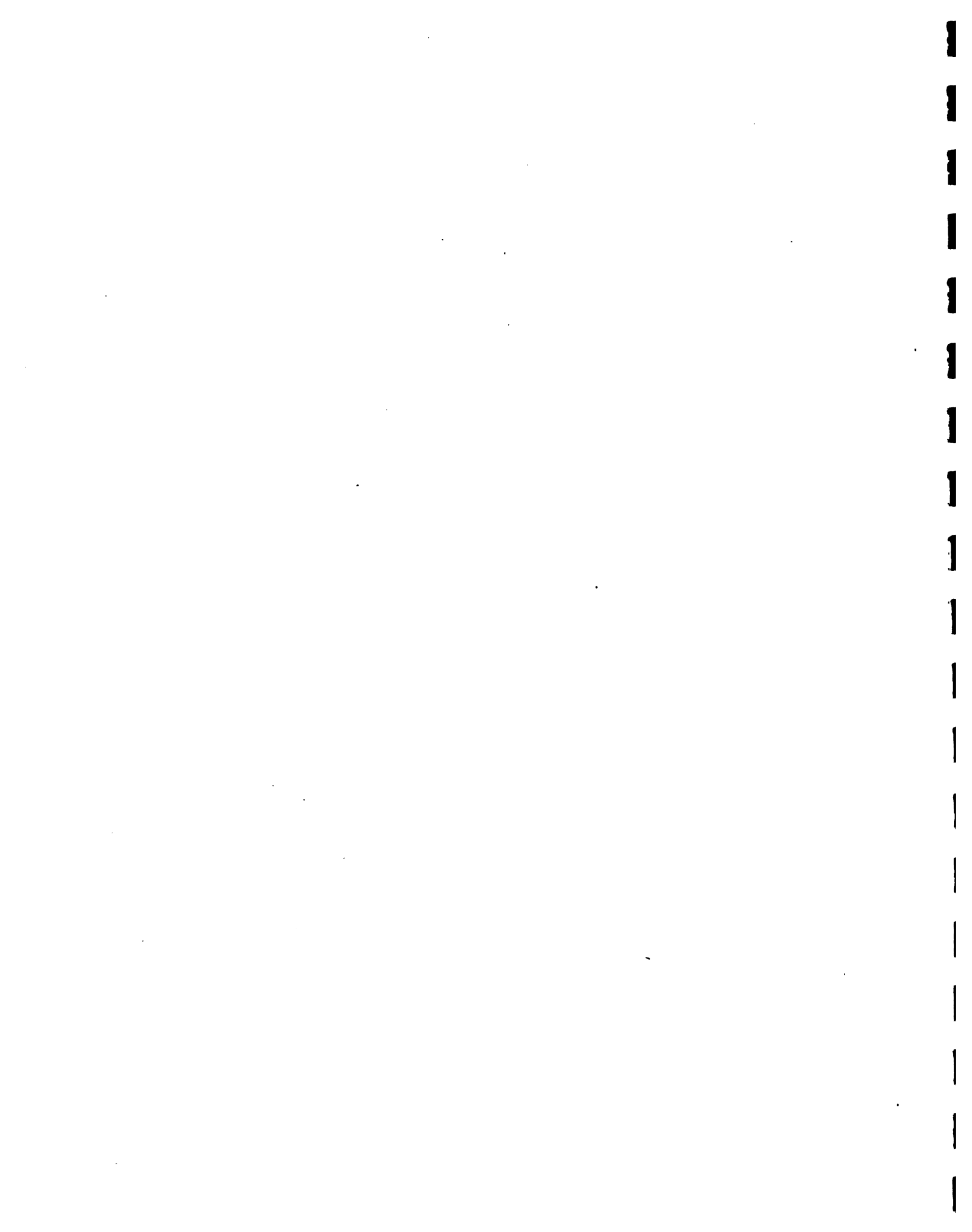
Estas tres técnicas presentadas pretenden dar una idea de la utilización de los análisis en agroclimatología; sin embargo, es sólo una pequeña muestra. Existen modelos más complejos que han sido desarrollados en los países avanzados (por ejemplo, simulación del

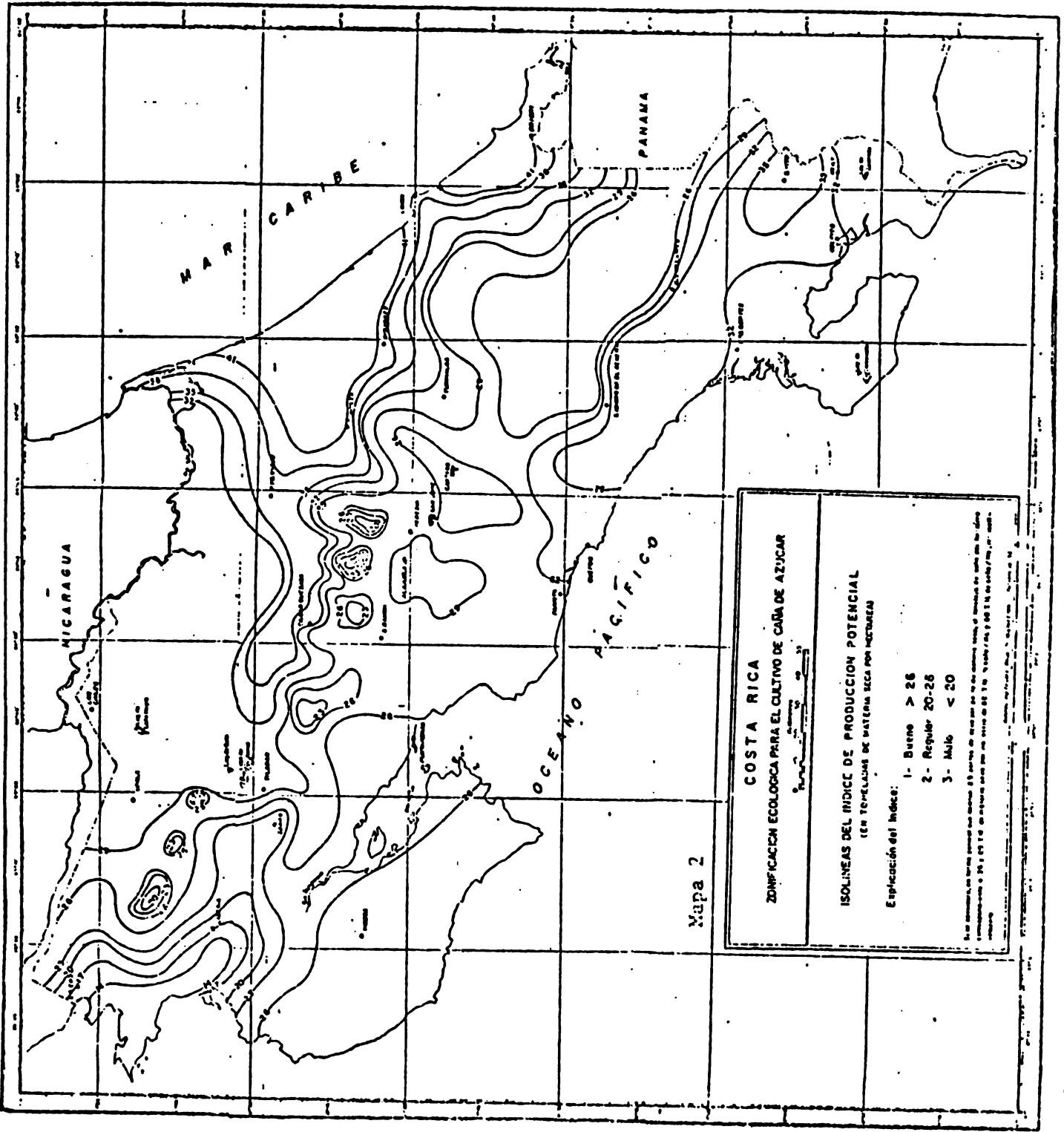




ZONIFICACION AGROECOLOGICA DEL CULTIVO

Fig. 6 Etapas del esquema metodológico necesarias para la zonificación agroecológica de cultivos.







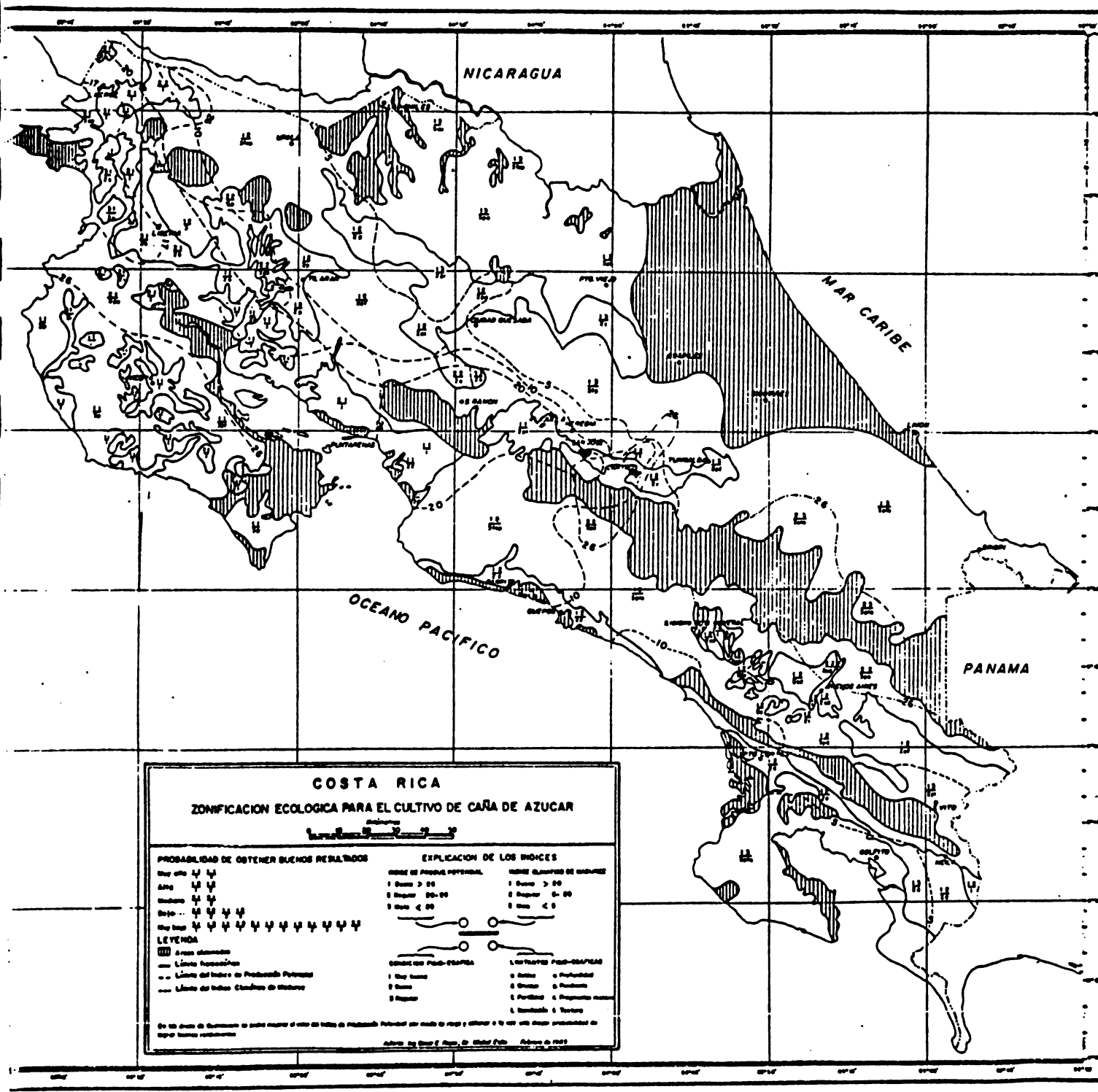
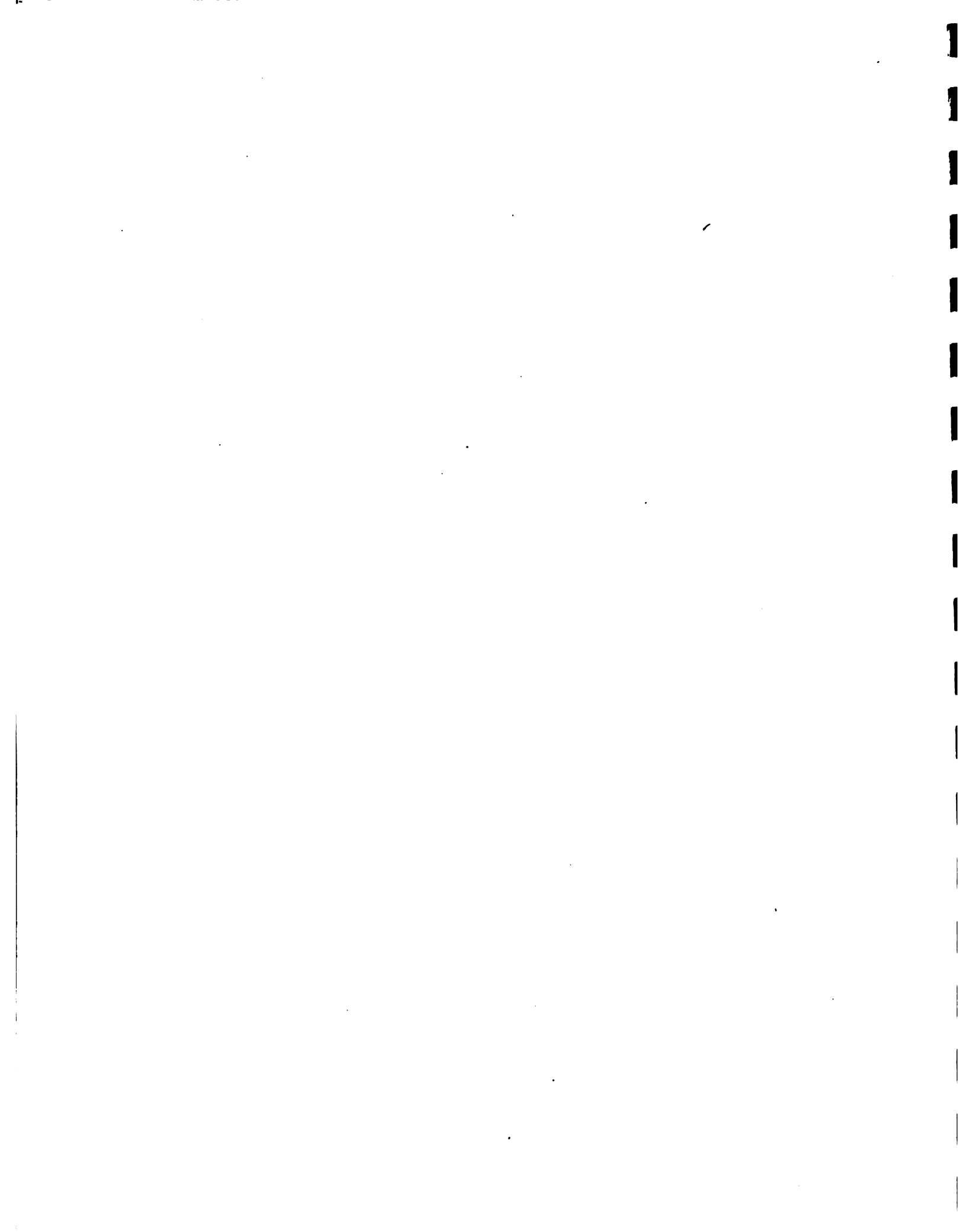


Fig. 3. Zonificación ecológica para el cultivo de la caña de azúcar.



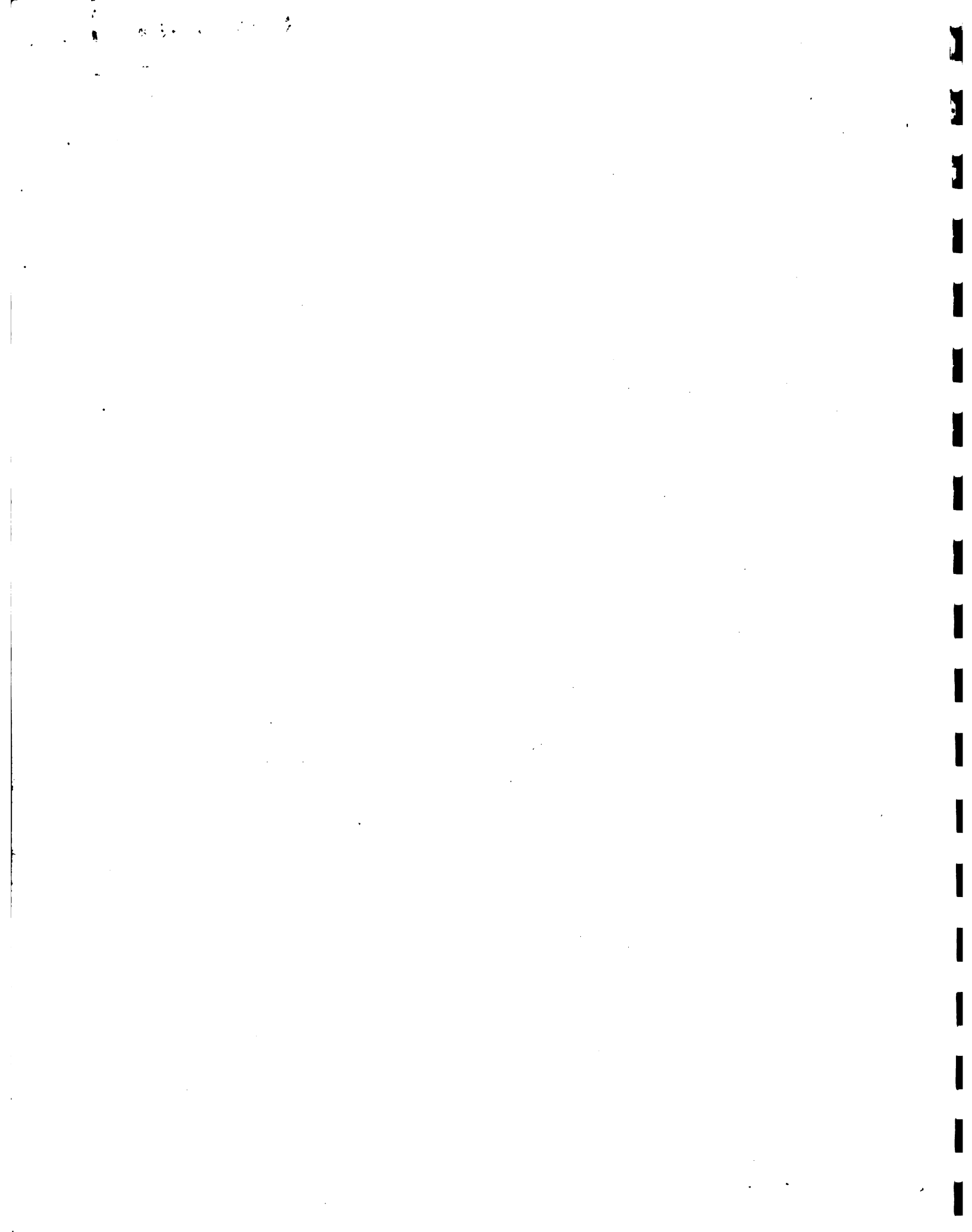
microclima para determinar la época con mayor probabilidad de incidencia de enfermedades para los cultivos).

También existen técnicas en la actualidad más sofisticadas como la teledetección o sensores remotos que conforme se estudia su aplicación en agricultura se vislumbra un potencial en su uso de incalculable valor. Esto se ha visto en las investigaciones realizadas con las imágenes del satélite Landsat, se espera que el conocimiento se incremente con el estudio de las nuevas imágenes que se obtendrán del SPOT.



BIBLIOGRAFIA

1. LHOMME, J.P., et.al. Evaluación de un modelo para caracterizar las condiciones hídricas de la zona cafetera colombiana. CENICAFE 36 (2) 64-76. 1985.
2. ROBELIN, M. Etude la sensibilité du maïs a la Sécheresse. Période critique de sensibilité. C.R. Acad. Agric. 1967.
3. ROJAS, O.E. y ELDIN, H. Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar (Saccharum officinarum) en Costa Rica. San José. LAICA/IICA. 1983. 120 p.
4. ROJAS, O.E. Etude agrométéorologique du bilan hydrique théorique et essai de modélisation d'irrigation dans le sud ouest de la France. Paris: Météorologie Nationale-Institut National Agronomique. 1984. 74 p.
5. _____. Estudio de las condiciones hídricas del Pacífico Norte de Costa Rica. IICA : Costa Rica. Serie Publicaciones Misceláneas no. 546. 1985. 73 p.
6. _____. Estudio Agroclimático de Costa Rica. IICA : Costa Rica. Serie Publicaciones Misceláneas no. 617. 1985. 178 p.





**VARIABLES AGROCLIMATICAS NECESARIAS
PARA EL PROCESO DE ZONIFICACION
AGROECOLOGICA DE CULTIVOS**

Oscar E. Rojas

**SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO**

**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA
LA AGRICULTURA**

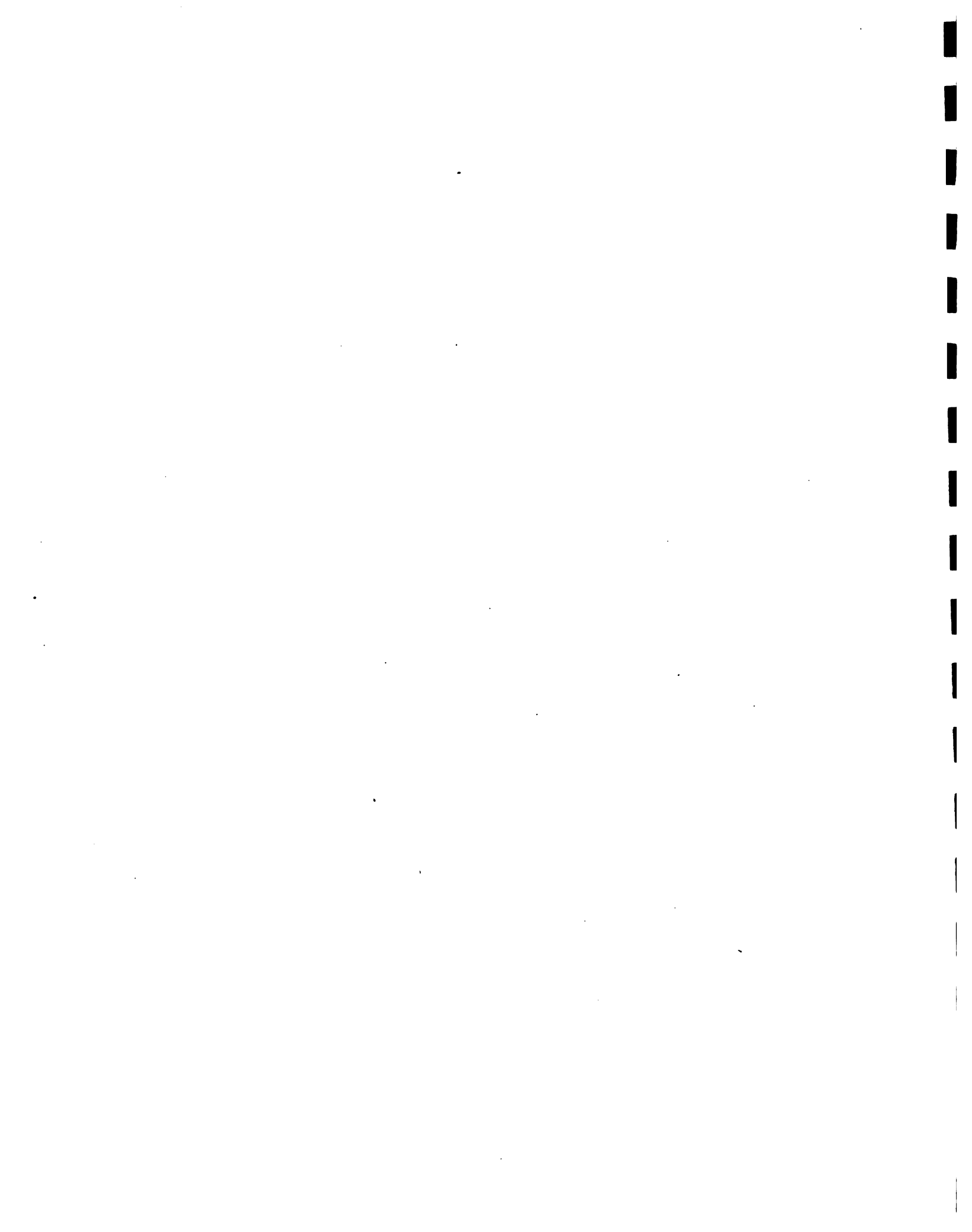
IICA

**SAN JOSE, COSTA RICA
OCTUBRE, 1987**



PRESENTACION

Dentro del marco de cooperación entre la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial de Desarrollo Agropecuario (SEPSA) y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) se ha estado brindando capacitación al equipo técnico en el manejo de variables climáticas para la definición del potencial de producción agrícola de las diferentes regiones del país. Esta capacitación se ha impartido por medio de conferencias de carácter teórico así como el desarrollo de trabajos prácticos. En el presente documento se presentan algunos aspectos teóricos relacionados con las principales variables del clima y su medición. No se pretende que el mismo sea considerado como un texto en esta materia, sino que sirva como ayuda de memoria para los aspectos considerados en las conferencias.



VARIABLES AGROCLIMATICAS NECESARIAS PARA
EL PROCESO DE ZONIFICACION AGROECOLOGICA DE CULTIVOS

INTRODUCCION

Los dos trópicos, el Norte y el Sur, que delimitan la zona intertropical, representan los límites Norte y Sur de la zona terrestre donde el sol puede pasar por el cenit. Las latitudes de los trópicos están definidas por el valor máximo de la declinación solar, 23°27', siendo la declinación solar el ángulo que hace el sol con el plano del ecuador.

Hay que recordar primero que el clima está bajo la influencia de un determinismo astronómico. El primer elemento característico del clima que se debe enumerar es la duración del día. Es un parámetro que varía según la latitud del lugar φ y la declinación solar δ , dependiendo a su vez del número del día del año J. La fórmula que da la duración del día N en horas y décimas se escribe:

$$N = 7,64 \text{ Arc } \cos(-\text{tg } \varphi \cdot \text{tg } \delta - 0,0106/\cos \varphi \cdot \cos \delta) \quad (1)$$

δ en radianes pudiendo estimarse por medio de la fórmula de aproximación siguiente:

$$\delta = 0,410 \text{ sen } (2J/365 - 1,405) \quad (2)$$

El Cuadro 1 muestra, para las distintas latitudes de la región intertropical, la variación de la duración del día según los meses del año. Ciertos cultivos son sensibles a la longitud del día, en particular a nivel de la floración. Este fenómeno se llama fotoperiodismo. Desde luego, este fenómeno no es de gran importancia en la zona intertropical, en donde la variación de la duración del día no es tan grande como en las zonas templadas.

Cuando se hable del clima hay que precisar siempre la escala espacial. El clima considerado en este estudio es el clima local o mesoclima caracterizado por los datos registrados en las estaciones de la red meteorológica. La zona representada corresponde aproximadamente a una escala de 1-10 km, según el relieve del lugar.



Cuadro 1

Duración del día expresada en horas y décimas en función del mes y de la latitud

LATITUD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
20°N	11,1	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
10°N	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7	12,7	12,5	12,2	11,9	11,7	11,6
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
10°S	12,7	12,5	12,2	11,9	11,7	11,6	11,6	11,8	12,1	12,3	12,6	12,7
20°S	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9	11,1	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3



A. CARACTERISTICAS DEL AIRE

1. La Temperatura

La temperatura del aire y sus variaciones diurnas y estacionales son muy importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas e influyen directamente en la longitud de los ciclos de cultivo. En las tierras bajas de la zona intertropical la temperatura del aire no constituye generalmente un factor limitante, ya que se queda muy por encima de los umbrales críticos; pero en las tierras altas, en los Andes por ejemplo, puede bajar hasta alcanzar la temperatura de congelación. Los termómetros que miden la temperatura del aire deben colocarse en una caseta meteorológica aireada y pintada de blanco, situada a dos metros encima del suelo, el cual debe estar enzacatado con el propósito de minimizar los efectos de la radiación.

Se caracteriza la temperatura del aire por la temperatura máxima diaria T_x y la temperatura diaria T_n , es decir las temperaturas más alta y más baja alcanzadas durante el día considerado. El termómetro de máxima es un termómetro de vidrio que emplea el mercurio como elemento térmico. El conducto capilar presenta una constricción en su base, encima del depósito, que impide que regrese el mercurio al depósito, una vez que ha salido, por efecto de las fuerzas de capilaridad. El termómetro de mínima emplea el alcohol como líquido térmico y un índice, constituido por una pequeña varilla de vidrio, que se mueve dentro del líquido, indicando el punto más bajo alcanzado por el menisco. La temperatura media diaria vale:

$$T_m = (T_x + T_n) / 2 \quad (3)$$

y la amplitud diaria de temperatura: $T_x - T_n$.

Para el registro continuo de la temperatura del aire se utiliza un aparato llamado termógrafo. Un brazo marcador, unido a un elemento medidor, tiene en su extremidad una pluma que toca una gráfica,

78

la cual está colocada sobre un cilindro que da una vuelta completa cada día o cada semana según el caso, gracias a un equipo de relojería ubicado dentro del cilindro. La temperatura media diaria con base horaria se escribe:

$$\bar{T} = \sum_1^{24} T/24 \quad (4)$$

2. La Humedad del Aire

El aire de la atmósfera contiene siempre, y en todas partes, una cierta cantidad de vapor acuoso que proviene de la evaporación del agua esparcida por la superficie del globo. Esta cantidad puede ser caracterizada y medida de varias maneras.

a. Presión parcial de vapor de agua p

La presión parcial de un gas que constituye una mezcla se define como la presión a la cual estuviera el gas considerado si ocupara, por sí solo, todo el volumen ocupado por la mezcla a la misma temperatura. Según la ley de Dalton, la presión atmosférica P_A es la suma de las presiones parciales del aire seco (P_a) y del vapor de agua (p):

$$P_A = P_a + p \quad (5)$$

El psicrómetro es el aparato generalmente utilizado para determinar la presión parcial del vapor de agua del aire. Está constituido por dos termómetros de vidrio colocados uno a la par del otro. Uno de los termómetros tiene su depósito cubierto con una tela de algodón, la cual debe estar húmeda al momento de la medición: se llama termómetro mojado o húmedo. El otro termómetro, llamado termómetro seco, indica simplemente la temperatura del aire. Por efecto de la absorción de calor que necesita la evaporación, la temperatura del termómetro

mojado T_h está siempre más baja que la del termómetro seco T . Conociendo estas dos temperaturas, se puede determinar el estado higrométrico del aire mediante la fórmula siguiente, llamada fórmula del psicrómetro:

$$p = P(T_h) - \gamma \cdot (T - T_h) \quad (6)$$

siendo γ la constante psicrométrica que vale $0,66 \text{ mb. } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $P(T_h)$ la presión máxima del vapor de agua a la temperatura del termómetro húmedo.

b. La humedad absoluta θ

Representa la cantidad de vapor de agua contenida en una unidad de volumen de aire en condiciones ambientales. Se expresa generalmente en gramos por metro cúbico ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Según la ecuación del estado de los gases podemos escribir:

$$\theta = m_v/V = (M_v/RT) \cdot p \quad (7)$$

siendo M_v la masa molar del agua (18), R la constante de los gases perfectos que vale 8,32 en el sistema internacional y T la temperatura absoluta en Kelvin. A una temperatura dada existe una relación constante entre la humedad absoluta y la presión parcial de vapor p .

c. La humedad relativa H

Es definida como el cociente, expresado en porcentaje, de la cantidad de vapor de agua que se encuentra en la atmósfera, en un momento determinado, por la que debería encontrarse para saturarla. Si θ indica la cantidad en $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ necesaria para la saturación y $P(T)$ la presión máxima correspondiente, podemos escribir, teniendo en cuenta la relación 7:

$$H = 100 \cdot (\theta / \theta_s) = 100 \cdot p / P(T) \quad (8)$$



Si el aire está seco, $\theta = p = 0$ y H vale 0. Si el aire está saturado $p = P(T)$ y H vale 100. La humedad relativa H es lo que realmente caracteriza el estado higrométrico del aire, particularmente respecto a las sensaciones que nosotros experimentamos de seco y húmedo.

La humedad relativa del aire se registra mediante un aparato que se llama higrógrafo. Es un instrumento con equipo de relojería que funciona de una manera parecida al termógrafo. La única diferencia es que el elemento medidor es constituido por una sustancia higroscópica que generalmente es un haz de cabello. En efecto, los cabellos tienen la propiedad de alargarse cuando aumenta la humedad relativa del aire. El higrógrafo, como el psicrómetro, debe colocarse dentro de la caseta meteorológica.

d. La temperatura del punto de rocío T_r

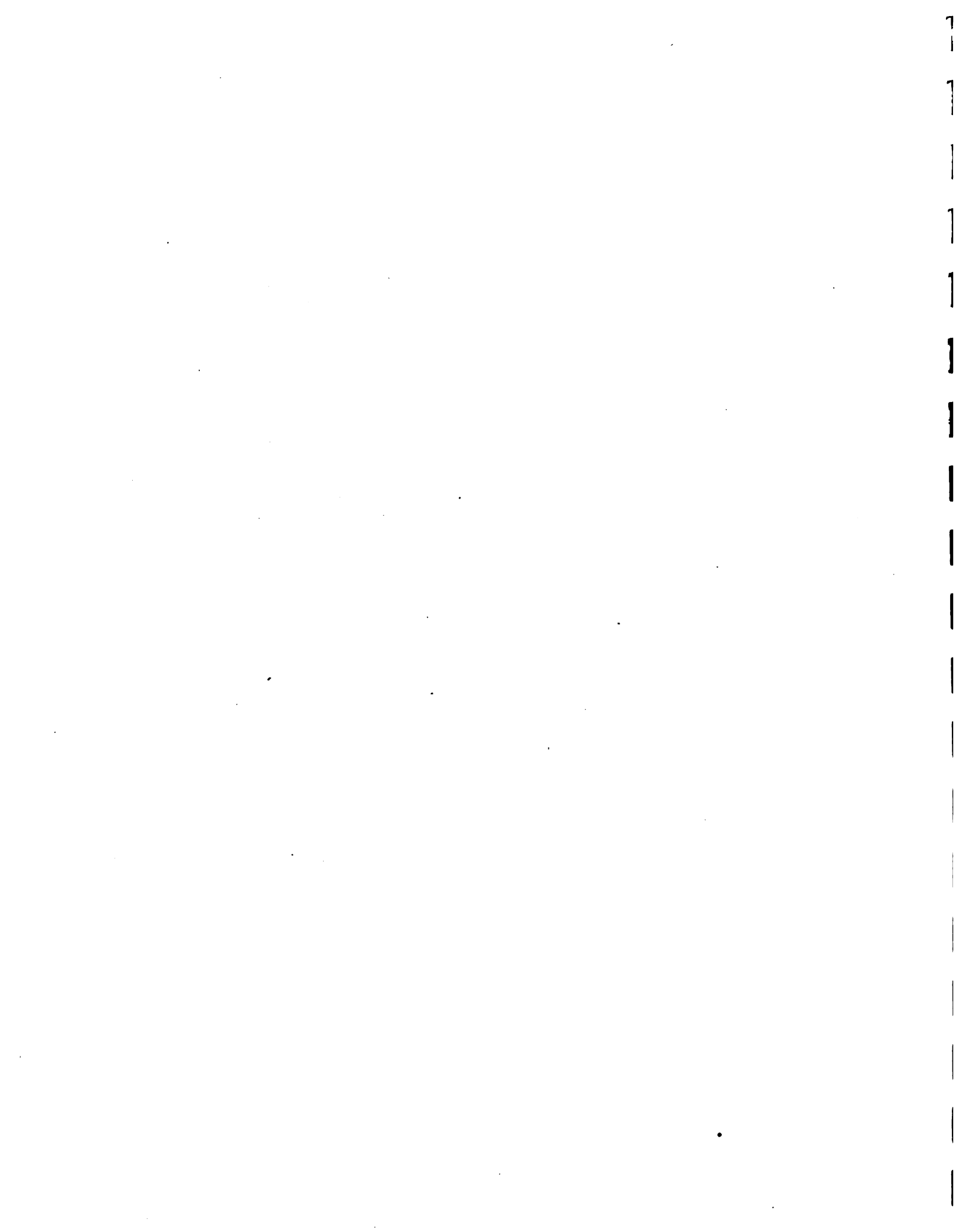
Es la temperatura hasta la cual se debe enfriar el aire húmedo, bajo una presión constante, para alcanzar el equilibrio líquido-vapor, es decir, obtener la condensación y la aparición del rocío. Esta temperatura se encuentra definida por la relación:

$$P(T_r) = p \quad (9)$$

3. Dirección y Velocidad del Viento

La dirección del viento se indica por el punto de donde procede: si el viento viene del Sur, por ejemplo, se dice que es del Sur. Se usan solamente ocho direcciones: N:Norte, NE:Noreste, E:Este, SE:Sureste, S:Sur, SW:Suroeste, W:Oeste y NW:Noroeste. El instrumento que indica la dirección del viento es la veleta.

La velocidad del viento se mide por medio de aparatos llamados anemómetros. Existen varios tipos de anemómetros, pero los más usados son los de molinete. El molinete se compone generalmente



de tres brazos horizontales, fijados sobre un eje vertical, que puede girar libremente. Cada brazo soporta una copela de media esfera. Se caracteriza la velocidad del viento por su velocidad media diaria o el camino recorrido por el viento por día.

B. LAS RADIACIONES

El sol constituye la mayor fuente de energía para la Tierra y da origen a casi todos los fenómenos meteorológicos. Además, la radiación solar actúa directamente de modo esencial sobre la actividad biológica de las plantas. El sol emite un espectro situado en la banda 0,2-3 μm . La luz visible o PHAR (Photosynthetic Active Radiation) abarca la banda 0,4 - 0,7 μm . En cambio, los cuerpos naturales que componen la superficie de la Tierra (tales como la vegetación) y los componentes de la atmósfera, emiten en el infrarrojo entre 3 y 100 μm .

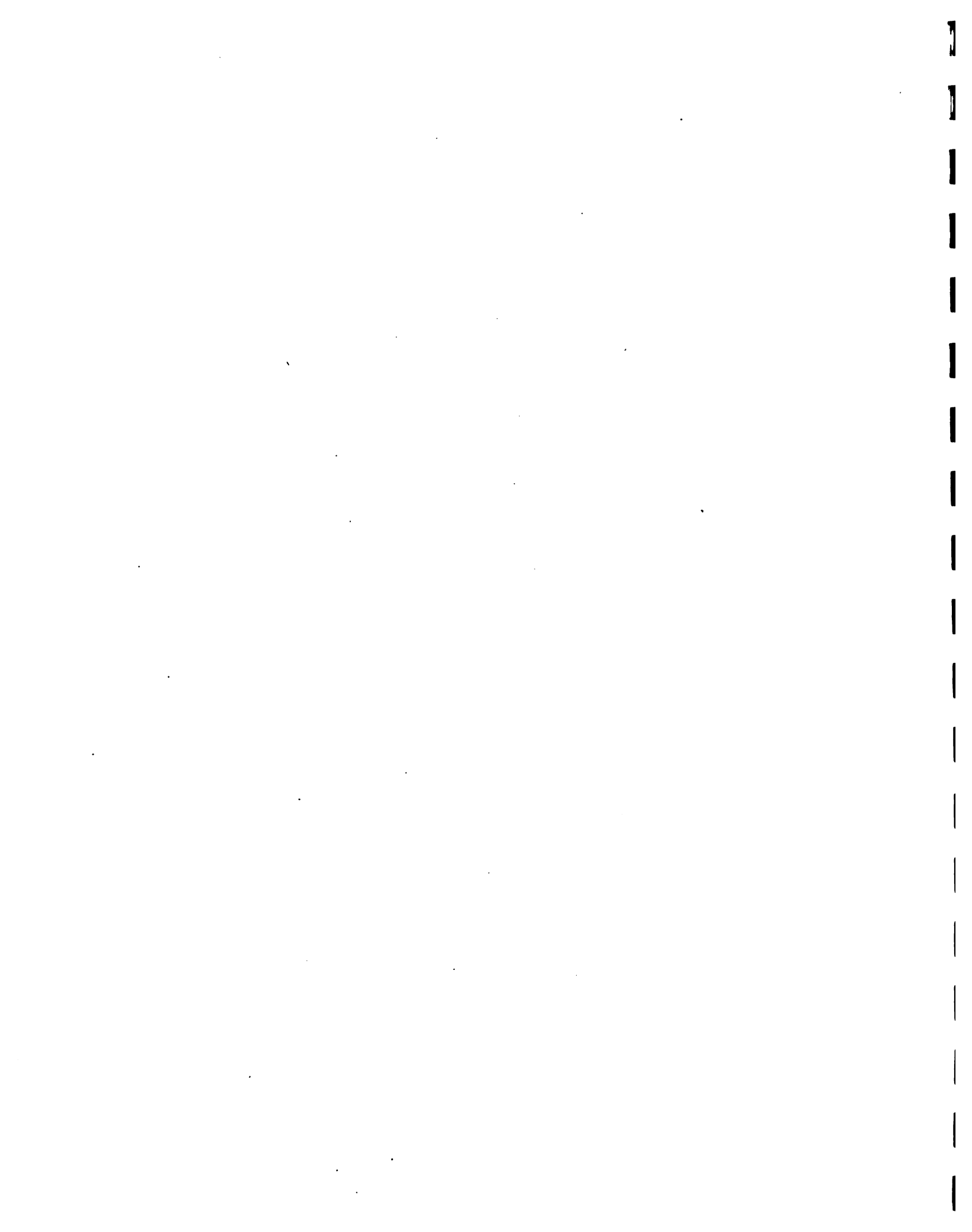
1. Definiciones

a. La radiación global R_g

Representa el flujo de radiación incidente de origen solar (banda 0,2 - 3 μm), recibido sobre una superficie horizontal y que proviene del cielo entero (ángulo sólido de 2π). Consta de dos tipos de radiaciones: la radiación directa, que proviene directamente del sol y la radiación difusa, que representa la radiación solar difundida, es decir, reflejada en todas las direcciones, por la atmósfera.

b. La radiación atmosférica R_a

Se define como el flujo de radiación de longitudes de onda largas, recibido sobre una superficie horizontal y que proviene de la totalidad del hemisferio celeste. Está constituida por la radiación propia de la atmósfera gaseosa, de las nubes y de los aerosoles que se encuentran en la atmósfera.



c. La radiación terrestre Rt

Representa el flujo de radiación emitido en todo el hemisferio celeste por una superficie natural horizontal. Es la emitancia o emisión hemisférica de la superficie considerada. Su valor es dado por la Ley de Stefan:

$$M = \epsilon \sigma T_s^4$$

siendo T_s la temperatura y ϵ la emisividad de la superficie.

σ es la constante de Stefan-Boltzmann que vale $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Para la mayoría de las superficies naturales ϵ está comprendida entre 0,96 y 1.

d. El balance de radiación a nivel del suelo Rn

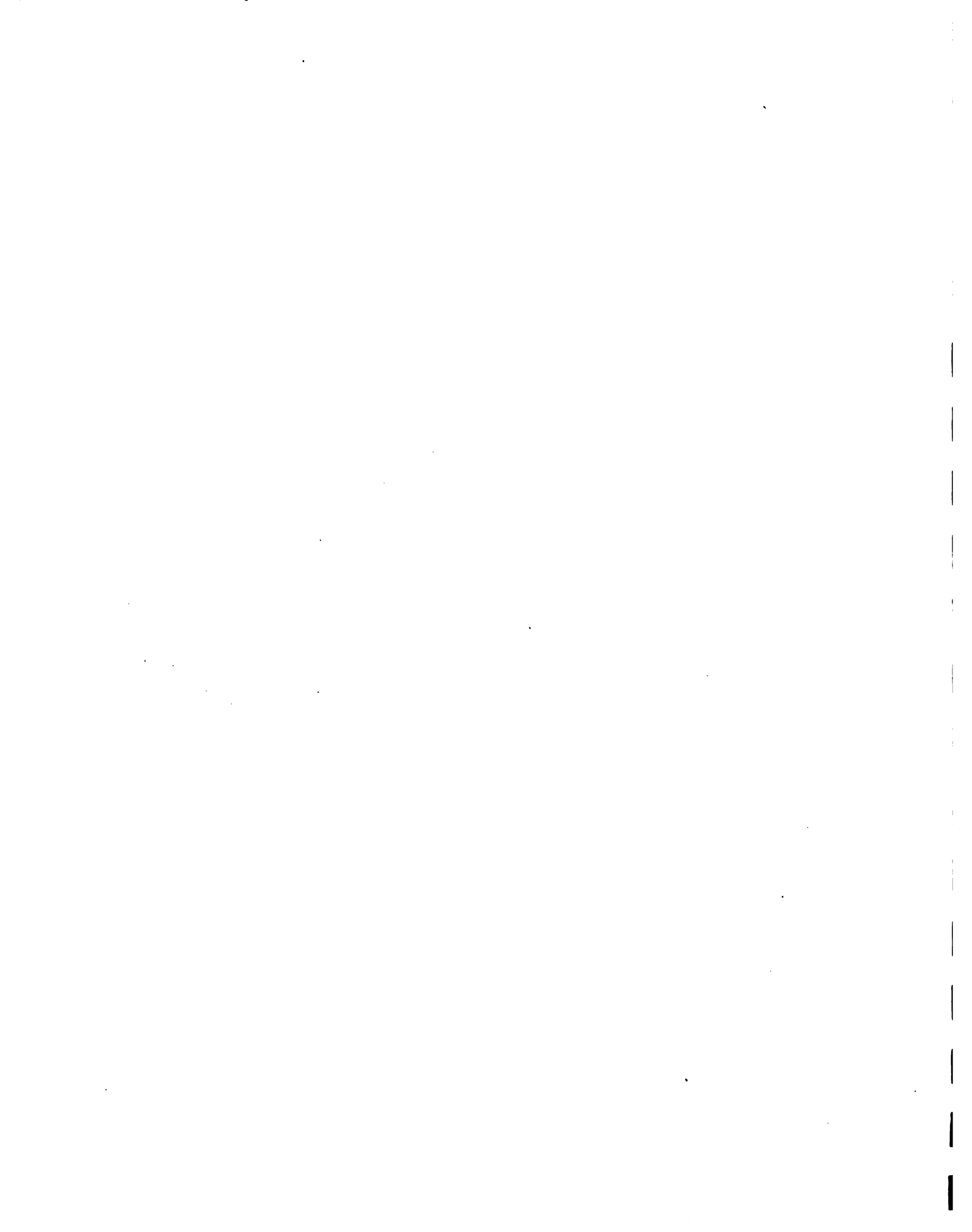
Una fracción de la radiación global incidente es reflejada por la superficie del suelo en todas las direcciones. El cociente de la radiación global reflejada (R_r) por la radiación global incidente (R_g) se llama albedo de la superficie (denotado a): $a = R_r / R_g$. El albedo varía en función de la naturaleza de la superficie y del ángulo de incidencia. Las coberturas vegetales tienen un albedo cuyo valor se aproxima generalmente a 0,20.

En cuanto a la radiación atmosférica R_a , las superficies naturales la absorben casi toda: su factor de absorción en el infrarrojo es igual a su factor de emisión ϵ . Por lo tanto, el balance de radiación o radiación neta (R_n) de una superficie horizontal se escribirá:

$$R_n = R_g - R_r + \epsilon Ra - \epsilon \sigma T_s^4 \tag{10}$$

o:

$$R_n = (1-a) \cdot R_g + \epsilon (Ra - \sigma T_s^4) \tag{11}$$



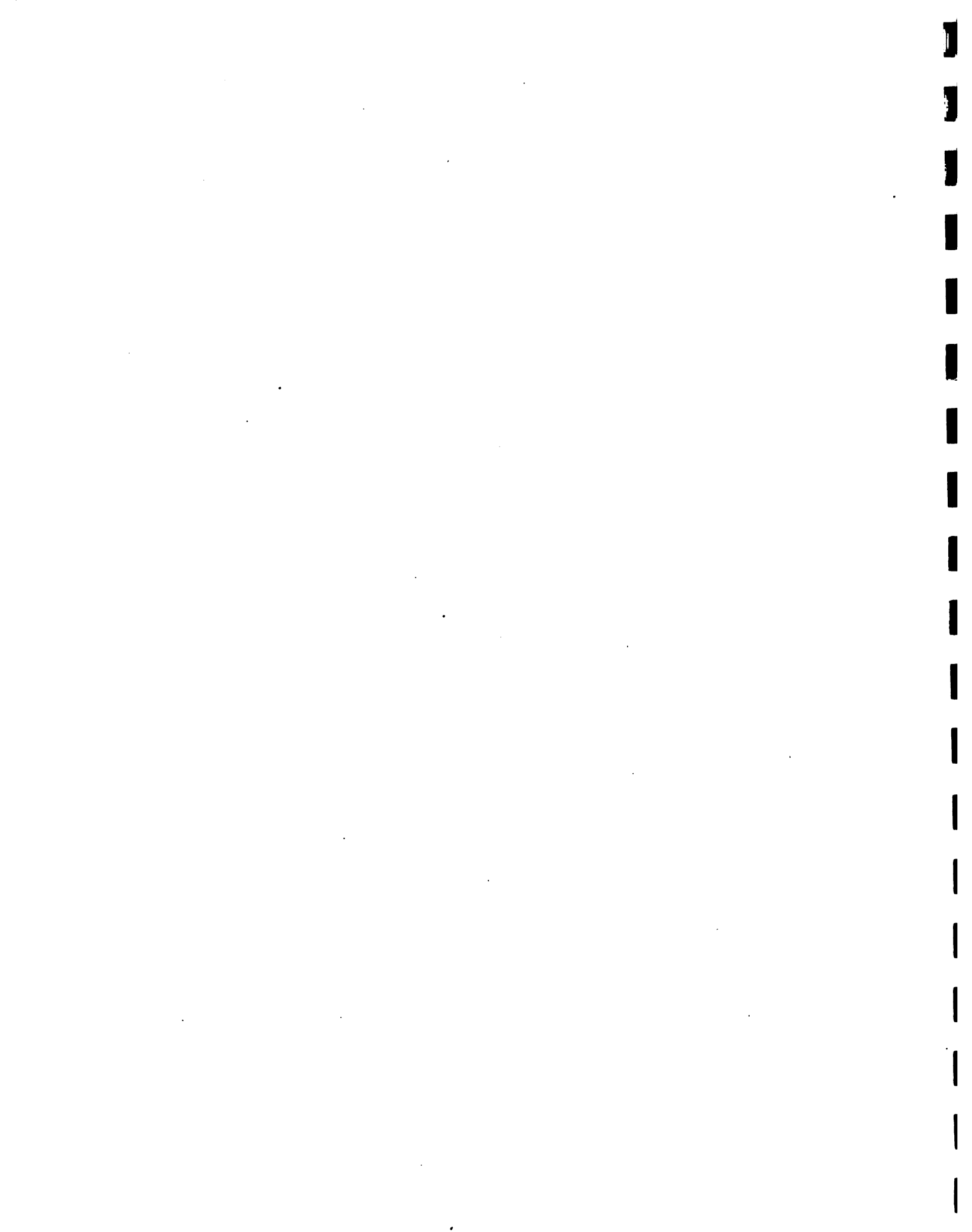
2. Medida y Estimación

a. Medida de la radiación global

Los aparatos que miden la radiación global se llaman piranómetros. El principio de su funcionamiento se base en la transformación de la energía de radiación en calor por absorción no selectiva sobre una superficie negra. Estos aparatos necesitan una calibración antes de ser utilizados.

En el caso de los piranómetros termo-eléctricos, la superficie negra absorbente está colocada horizontalmente y recibe la radiación solar bajo un ángulo sólido de 2π (un hemisferio). El elemento medidor es una pila termo-eléctrica, cuya señal es función de la diferencia de temperaturas entre el aire ambiente y la superficie que recibe la radiación medida. Hay una relación de proporcionalidad entre la fuerza electromotriz (f.e.m.) producida por la pila y el flujo de energía recibida.

El piranómetro de destilación (tipo Gun-Bellani) está constituido por dos esferas concéntricas. La esfera interna está cubierta con una capa absorbente que se comporta como un cuerpo negro para la radiación solar; contiene un líquido volátil (alcohol o agua destilada) y abajo se comunica con un tubo de vidrio graduado. La esfera externa, hecha de vidrio transparente, deja pasar toda la radiación solar. Entre las dos esferas existe el vacío, para evitar los intercambios de calor por conducción y convección. El principio del aparato es el siguiente. El calor absorbido por la esfera interna se transmite al líquido, provocando la vaporización de una cierta cantidad de líquido. El vapor producido deja la esfera y se condensa en el tubo graduado, que está en equilibrio térmico con el aire ambiente y, por consiguiente, a una temperatura más baja que la de la esfera. Existe una relación de proporcionalidad entre la cantidad de líquido condensado y la energía solar recibida por la esfera. Cuando el tubo está lleno,



se debe invertir para que se vacíe y el líquido vuelva a llenar la esfera.

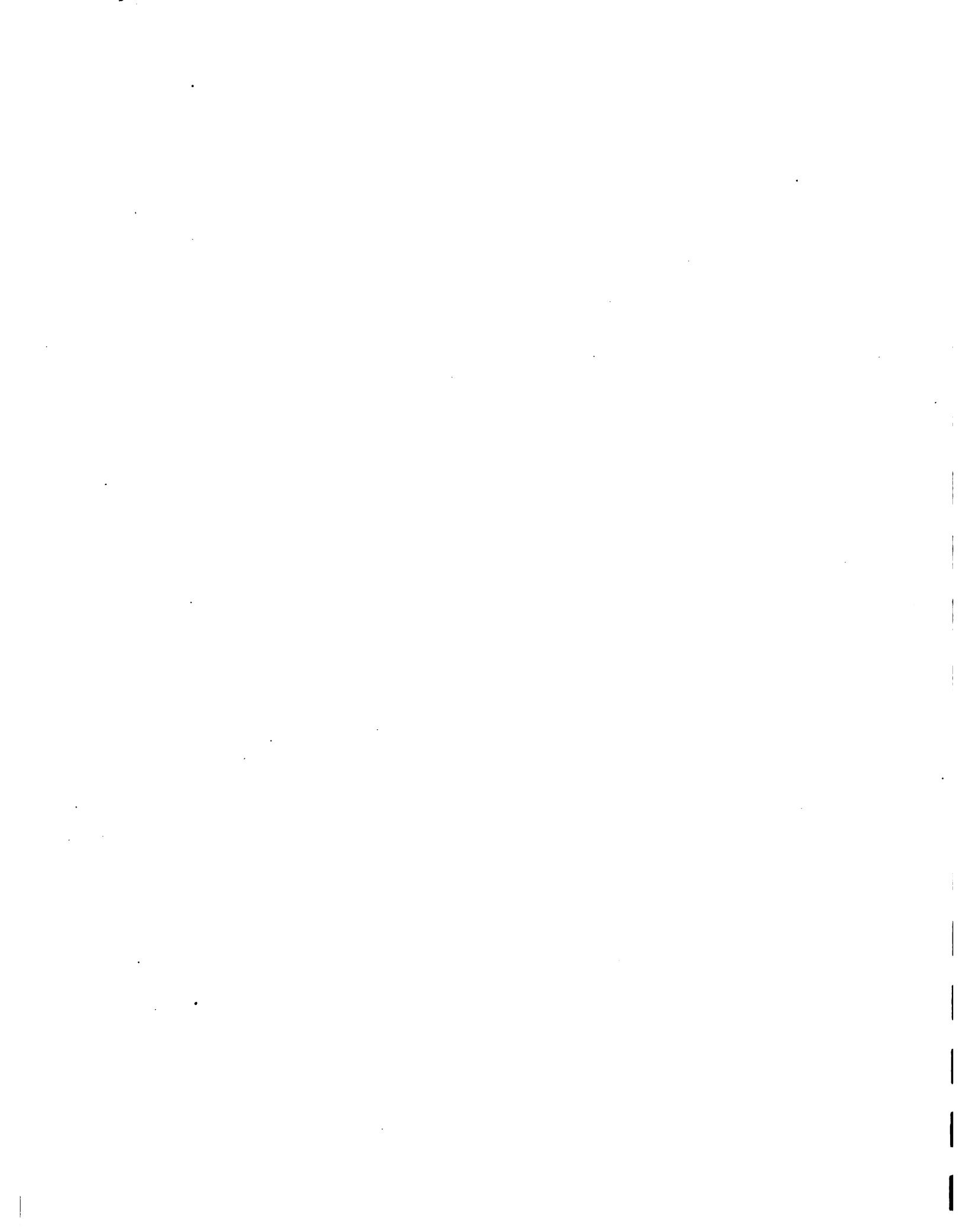
A nivel de la red meteorológica se mide el valor acumulado de la radiación global entre el amanecer y la puesta del sol.

b. Estimación de la radiación global a partir de la duración de insolación

La duración de insolación o de "brillo solar" se define como el tiempo durante el cual el disco solar ha sido visible en el transcurso del día; es decir, el tiempo durante el cual se pueden observar las sombras de los objetos en el suelo. El aparato que mide la duración de insolación se llama heliógrafo. El heliógrafo más usado y recomendado por la Organización Mundial de la Meteorología (OMM) es el de Campbell-Stokes, el cual está basado en el efecto térmico de la radiación solar directa: una esfera de vidrio concentra los rayos del sol sobre una banda de cartón graduada en horas y décimas y provoca una quemadura, o solamente una decoloración, según la intensidad de la radiación. La banda de cartón se coloca sobre un casquete metálico en las guías que existen con este fin. La buena orientación e inclinación del aparato hacen que la quemadura progrese sobre la banda, conforme el sol avanza en su trayectoria, formando una línea paralela a la línea mediana de la gráfica. La longitud de la parte quemada de esta línea representa la duración diaria de insolación n .

Se puede estimar la radiación global diaria R_g a partir de la duración de insolación (brillo solar) n medida por el heliógrafo mediante una fórmula de tipo Black o Prescott. Esta fórmula hace intervenir la duración teórica del día N y la radiación global al nivel superior de la atmósfera que le corresponde de R_{g_0} (llamada también valor de Angot):

$$R_g/R_{g_0} = (a + \beta \cdot n/N) \quad (12)$$



α y β son dos coeficientes calculados estadísticamente, cuyos valores varían según las zonas climáticas. La FAO recomienda para la zona intertropical húmeda: $\alpha = 0,29$, $\beta = 0,42$. N y Rg_0 son dos parámetros astronómicos que dependen de la latitud del lugar considerado y del momento del año. Sus valores se encuentran en tablas o se pueden calcular mediante fórmulas (véase fórmula 1). La utilización de este tipo de relación estadística debe efectuarse con prudencia. El cálculo a partir de un valor aislado puede ser malo; en cambio, da buenos resultados si se utilizan promedios que permiten compensar la variabilidad.

c. Estimación de la radiación neta

La radiación neta o balance radiativo se compone de dos balances parciales: el de onda corta $(1-\alpha) Rg$ y el de onda larga $Rn_1 = (R_a - \sigma T_s^4)$. El segundo término se estima generalmente mediante una fórmula de tipo Brunt que presentamos a continuación con los coeficientes más utilizados:

$$Rn_1 = - \sigma T^4 (0,56 - 0,079 \sqrt{p}) (0,1 + 0,9 n/N) \quad (13)$$

siendo T la temperatura media del aire en Kelvin, p la presión media de vapor de agua del aire en milibares y n/N la fracción de insolación.

Para una región determinada existe generalmente un cociente aproximadamente constante entre la radiación neta y la radiación global:

$$Rn/Rg = c \quad (14)$$

El autor, por ejemplo, determinó en Costa de Marfil (Africa del Oeste) un valor de c igual a 0,67, considerando únicamente la fase diurna del día. Este tipo de relación tiene la ventaja de ser muy simple.



C. PRECIPITACION Y EVAPORACION

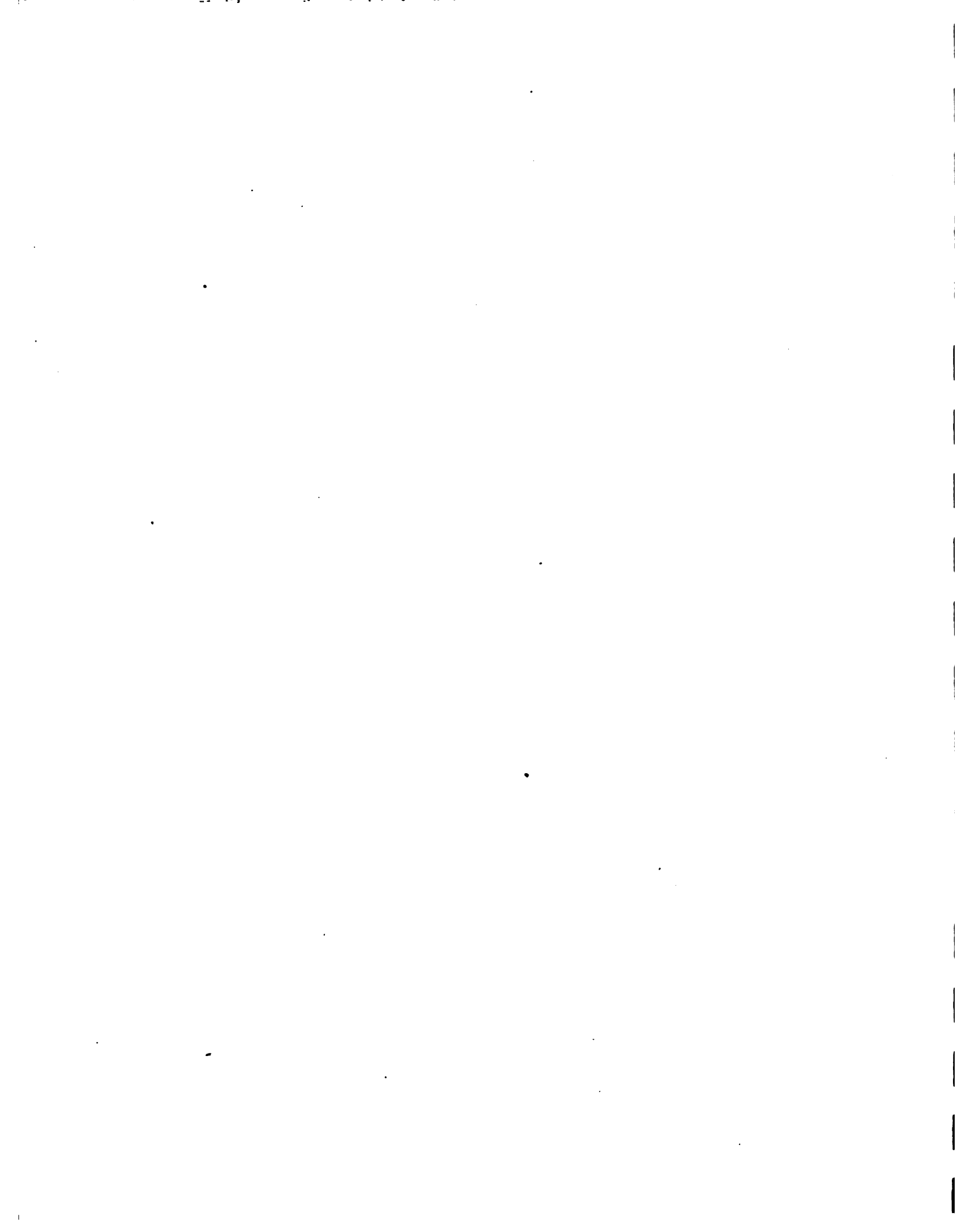
1. La Precipitación

La precipitación del valor de agua contenido en la atmósfera puede efectuarse ya sea en forma líquida, como la lluvia, o en forma sólida, como la nieve o el granizo. Además existen precipitaciones llamadas ocultas, tales como el rocío y la escarcha.

Para medir la lluvia a nivel del suelo se usan aparatos llamados pluviómetros. Están constituidos por una superficie colectora circular, colocada horizontalmente y un recipiente donde se almacena el agua. El pluviómetro "Association" utilizado en Francia y Africa francófona, tiene un diámetro de 226 mm y una superficie de recepción de 400 cm^2 ; el del Weather Bureau, de los Estados Unidos, un diámetro de 8 pulgadas=203 mm. El agua colectada se mide por medio de una probeta graduada directamente en milímetros de agua (una altura de n milímetros corresponde en volumen a un número igual de litros por metro cuadrado).

2. La Evaporación

Para medir la evaporación de una superficie libre de agua se utilizan los tanques de evaporación. Estos son cubetas llenas de agua, en las cuales se mide la variación del nivel del agua provocada por la evaporación. El tanque recomendado por la OMM es el tanque Class A, del Weather Bureau (USA), de forma cilíndrica. Su diámetro vale 1,22 m y su profundidad 0,254 m (10 pulgadas). El nivel del agua debe ser mantenido aproximadamente a 5 cm del borde. El tanque está colocado sobre una base de madera. Dentro de éste, se halla un cilindro (cilindro estabilizador), el cual sostiene un tornillo micrométrico que sirve para la medición.



D. LA EVAPOTRANSPIRACION

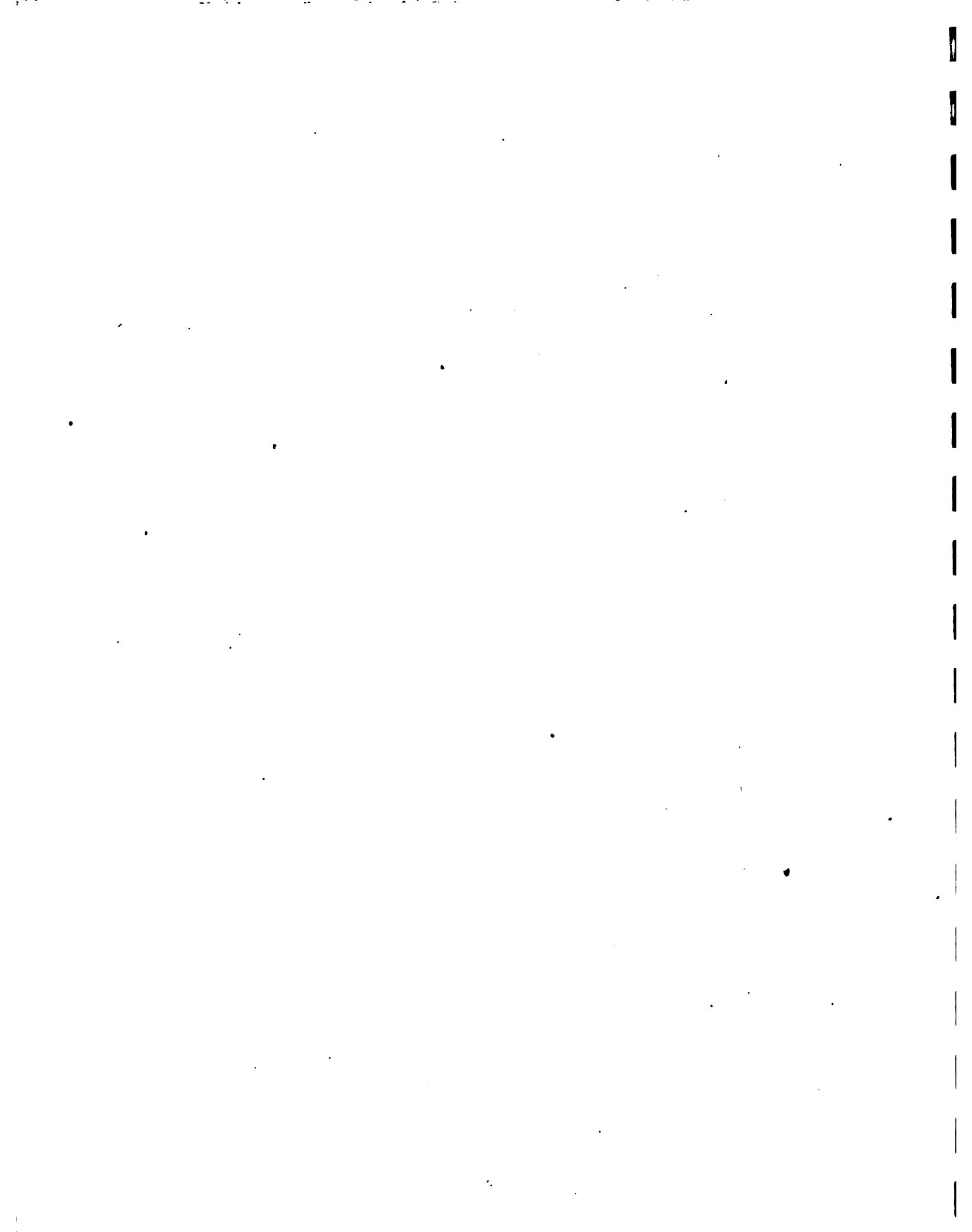
1. Terminología Clásica

De una manera general, la evaporación (E) de una superficie natural representa la cantidad de agua que es disipada en la atmósfera, a partir de esta superficie, por el proceso de vaporización. Se habla de evapotranspiración (notada ET) cuando la superficie natural considerada es una vegetación, porque, en este caso, la cantidad de agua perdida por la superficie es la suma de la evaporación física del suelo y de la transpiración vegetal. Para una vegetación bien desarrollada, la transpiración es generalmente muy superior a la evaporación del suelo. La cantidad total de agua evapotranspirada representa el consumo en agua de la vegetación. La mayor parte del agua transpirada por la planta se difunde por las pequeñas aberturas que constituyen los estomas situados sobre el limbo foliar. El vegetal tiene la posibilidad de regular la difusión del agua a través de los estomas, controlando su abertura y hasta su cierre completo. Este mecanismo regulador entra en juego tan pronto como el abastecimiento hídrico de la planta por las raíces ya no puede compensar la pérdida de agua de las partes aéreas.

La evapotranspiración real, notada ETR, representa la cantidad de agua expresada en milímetros, efectivamente disipada en la atmósfera a partir de una superficie vegetal dada, durante un período de tiempo dado.

La evapotranspiración máxima, notada ETM, representa la evapotranspiración real de una cobertura vegetal, cuya transpiración es máxima (abertura máxima de sus estomas); es decir, en el caso de un buen abastecimiento hídrico de las plantas.

La evapotranspiración potencial, notada ETP, representa la evapotranspiración máxima de una cobertura vegetal que cubre completamente el suelo y que está en fase activa de crecimiento.



Entre estos tres tipos de evapotranspiración existen las desigualdades siguientes:

$$ETP \geq ETM \geq ETR \geq 0 \quad (15)$$

Durante mucho tiempo se ha considerado que el valor de la ETP era el mismo para todos los tipos de vegetación; es lo que se llama "hipótesis ETP", basado sobre la noción de un requerimiento hídrico, a lo cual serían sometidas las coberturas vegetales por parte del clima, independientemente de su naturaleza. En la actualidad se tiende a abandonar este concepto.

2. Medida de la Evapotranspiración

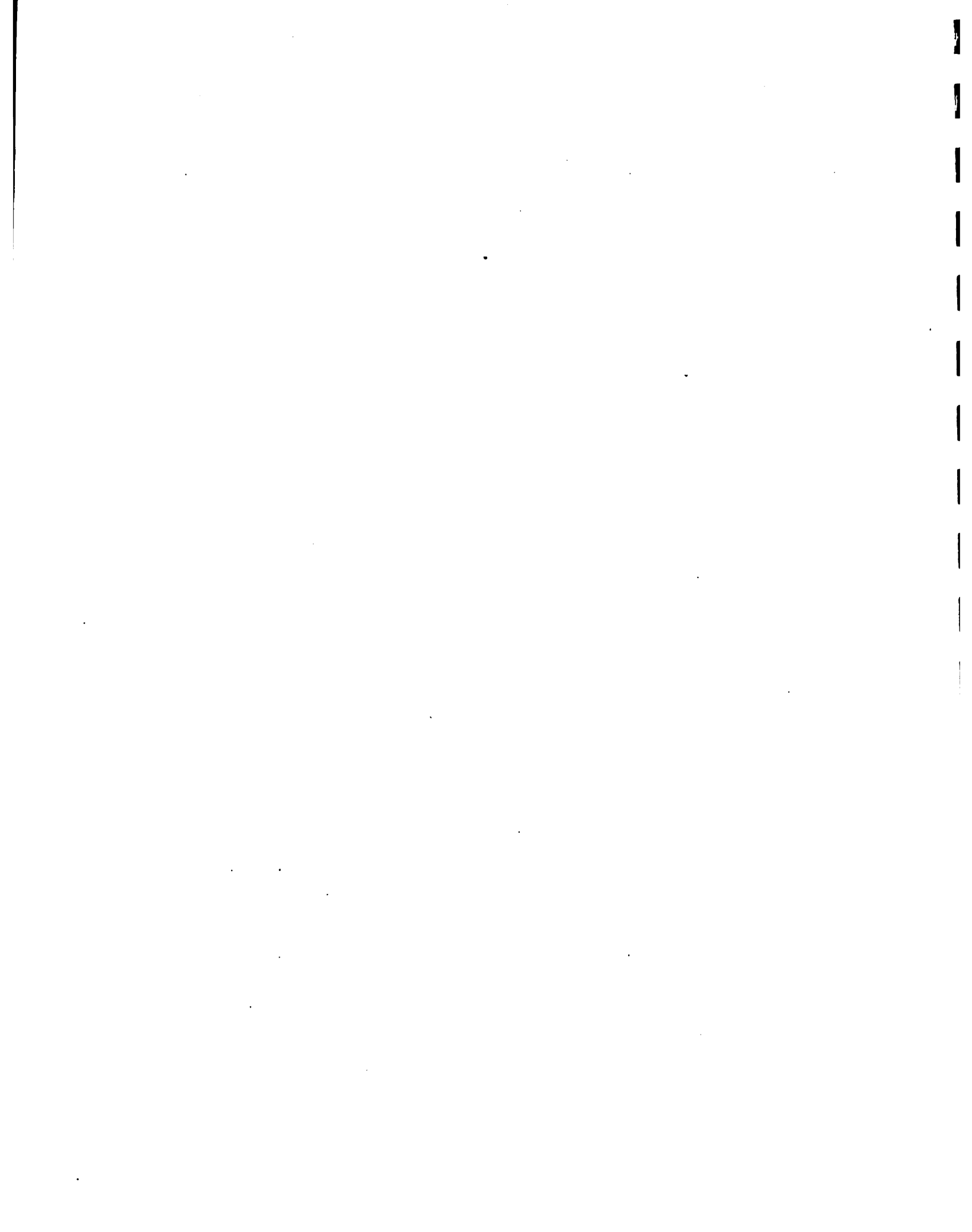
La evapotranspiración (ET) se mide por medio de aparatos llamados lisímetros o evapotranspirómetros. Los evapotranspirómetros o lisímetros clásicos de drenaje están constituidos por una especie de cubeta, a manera de estanque, que contiene una parte del suelo, en la cual se miden los aportes de agua (P: precipitaciones y R: riego) y las pérdidas por drenaje (D). Se mantiene el suelo a la humedad constante de la capacidad de campo, provocando y manteniendo un drenaje constante. La ecuación que traduce el balance hídrico se escribe:

$$ET = (P + R) - D \quad (16)$$

ET, en este caso, representa una evapotranspiración máxima (ETM).

Este tipo de medida es posible solamente si se considera un período bastante largo, de dos o tres días, a causa de la inercia del dispositivo. La precisión de la medida generalmente no es muy buena.

Para medir la evapotranspiración a una escala de tiempo más fina se utilizan dispositivos de mayor sensibilidad, que miden directamente la variación de la cantidad de agua del suelo por peso de la cubeta. Estos se denominan evapotranspirómetros pesables. No es necesario pues mantener constante la humedad del suelo. Varias técnicas son utilizadas para pesar la cubeta. De estas técnicas depende la precisión de la medida.



3. Estimación de la Evapotranspiración

La formulación general de la evapotranspiración aparece como la suma de dos términos, un término de radiación E_r y un término de convección E_a :

$$ET = (P' \cdot E_r + \gamma \cdot E_a) / (P' + \gamma) \quad (17)$$

siendo γ la constante psicrométrica y P' la pendiente media de la curva que da la presión máxima de vapor de agua en función de la temperatura. E_r representa la suma algebraica de la radiación neta R_n y del flujo de calor en la superficie del suelo G :

$$E_r = R_n + G \quad (18)$$

Se ha podido comprobar experimentalmente que en numerosas situaciones E_a era poco diferente de cero, particularmente en los climas que no son demasiado secos y para las coberturas vegetales que no tienen un abastecimiento hídrico malo. En estas condiciones, la evapotranspiración se acerca al término de equilibrio siguiente:

$$ET_0 = P' / (P' + \gamma) \cdot (R_n + G) \quad (19)$$

Este término se llama evapotranspiración estándar, y es recomendado como término y medida de referencia para la evapotranspiración real.

Utilizando el concepto de ETP (hipótesis ETP), se han elaborado numerosas fórmulas empíricas, que permiten calcular el valor de la evapotranspiración potencial a partir de ciertos parámetros climatológicos, tales como la temperatura, la radiación global o la humedad del aire. Estas fórmulas resultan del ajuste empírico a valores medidos de la ETP, generalmente de un césped o un prado. Se les da el nombre de evapotranspiración potencial climática (ETP_c). De todas estas fórmulas climáticas la más conocida y la más utilizada es la de Penman (propuesta en 1956). La fórmula de



Penman se basa en la expresión teórica de la evapotranspiración (fórmula 17). Calculando ETP en una base diaria, se supone que G vale cero y Rn y Ea expresados en mm d⁻¹ se escriben:

$$Rn=0,0041 [0,80 Rg - \sigma T^4 (0,56-0,079 \sqrt{p}) (0,1 + 0,9 n/N)] \quad (20)$$

$$Ea=0,26 \cdot (1 + 0,54 V) (P(T)-p) \quad (21)$$

Rg la radiación global expresada en J . cm⁻² . d⁻¹

σ la constante de Stefan (4,89 . 10⁻⁷ J . cm⁻² . d⁻¹ . K⁻⁴)

T la temperatura media del aire en Kelvin.

p la presión media de vapor de agua en milibares

n/N la fracción de insolación

V la velocidad del viento medida a una altura de 2 m y expresada en m . s⁻¹

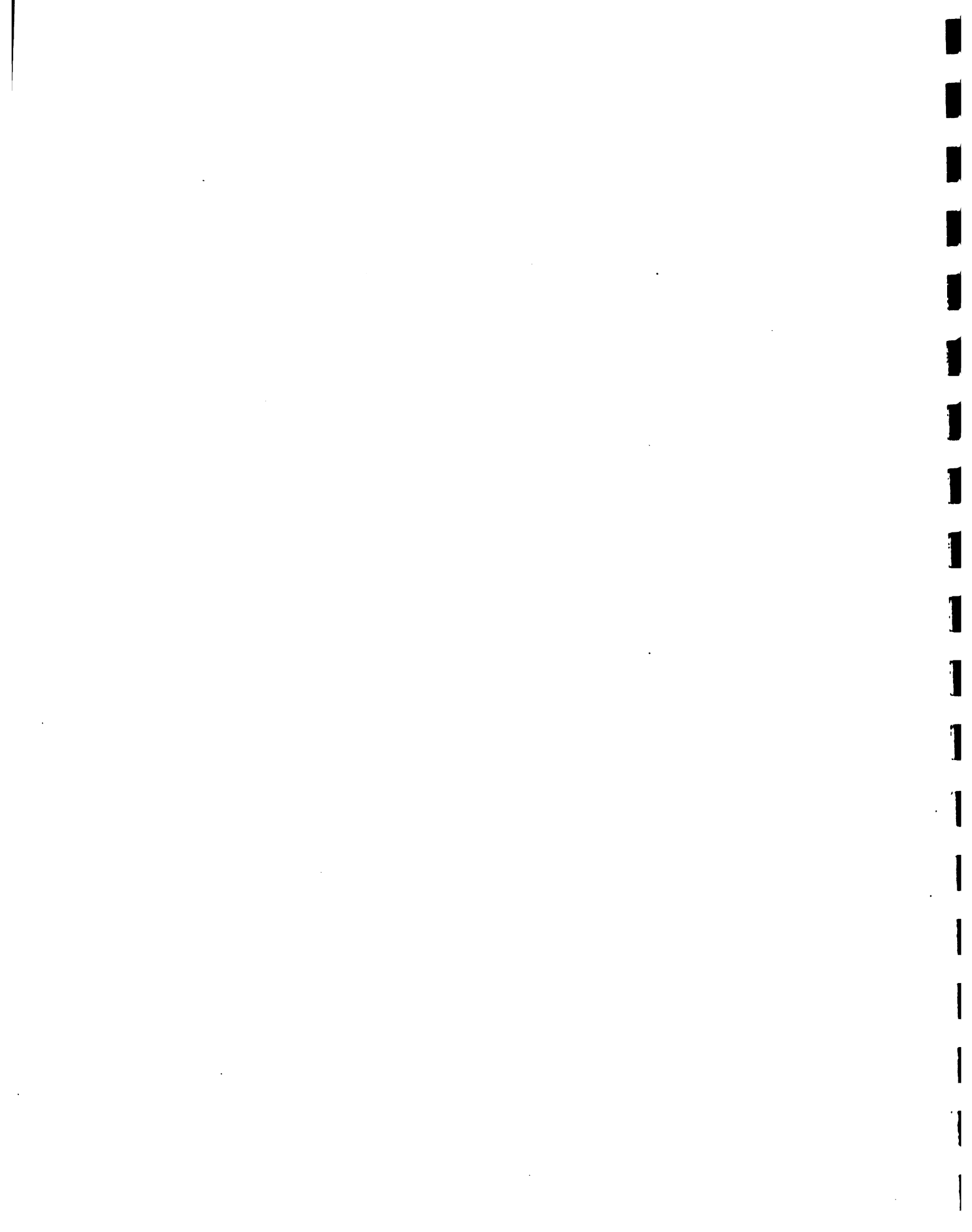
P(T) la presión máxima de vapor de agua a la temperatura T en mb.

Presentamos en el Cuadro 2 los valores de la ETP Penman para algunas localidades de la zona intertropical americana.

E. LA CARACTERIZACION ESTADISTICA DEL CLIMA

1. Reducción de la Información Básica Diaria

Los valores diarios observados o registrados a nivel de la red meteorológica constituyen series de datos muy largas. A veces se necesitan estos datos en su forma elemental, pero lo más frecuente es que se intente reducirlas utilizando sumas cuando los datos se pueden acumular (tales como la lluvia, la evaporación, la duración de insolación o la radiación solar) o en forma de promedios para los demás (temperatura, humedad del aire). El período de tiempo utilizado es múltiplo del día; se utiliza generalmente la década, el mes o el año.

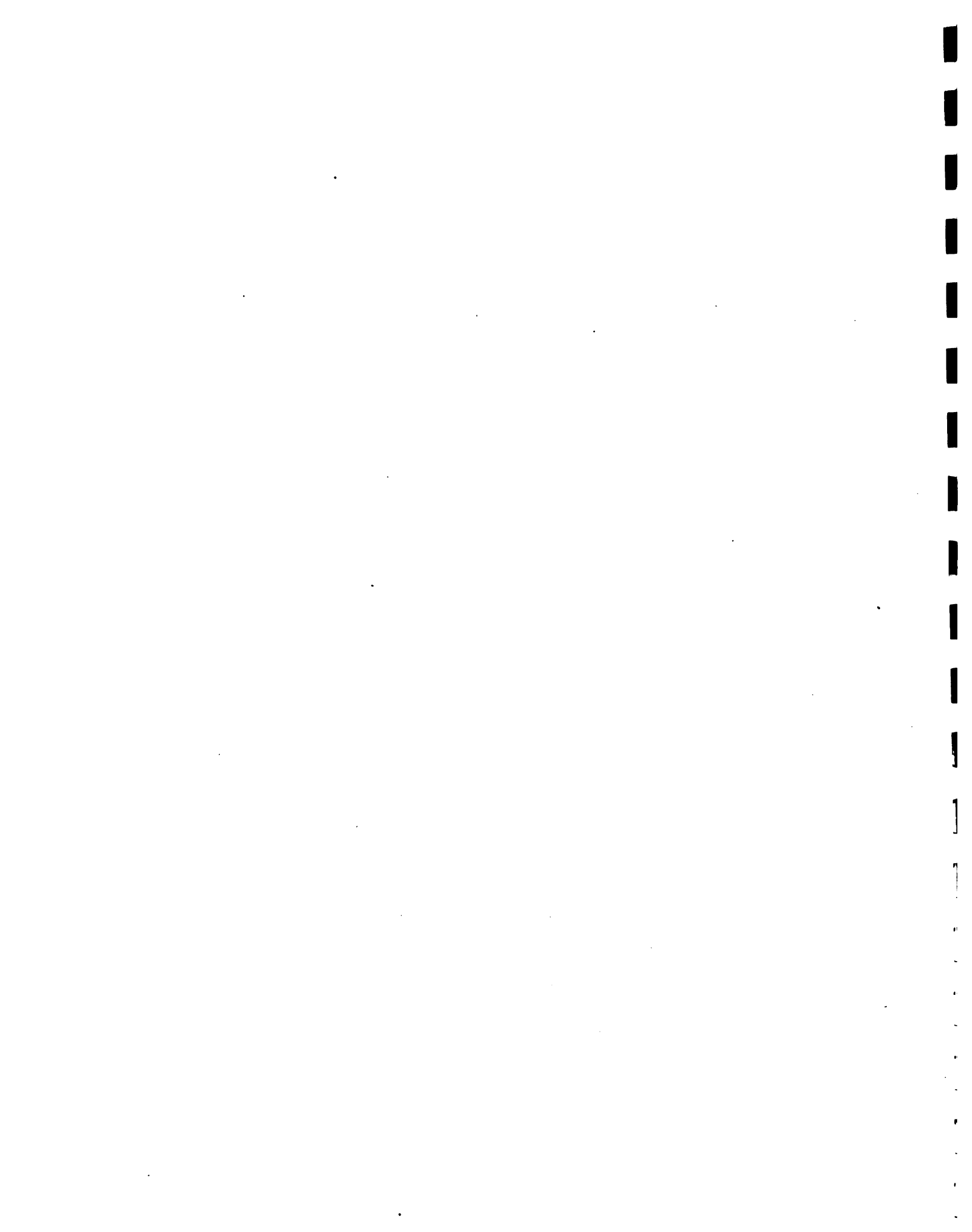


Cuadro 2

ETP según Perman expresada en milímetros por día para algunas localidades. Entre paréntesis está la latitud de la localidad.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
SANTO DOM. (18,29)	4,1	4,1	5,1	5,3	5,4	5,4	5,6	5,6	5,1	4,8	4,4	4,2
CAYENNE (4,5)	3,6	3,5	4,2	4,0	3,7	3,5	3,9	4,4	4,8	5,0	4,2	3,7
BELEM (-1,28)	3,5	2,9	3,4	3,3	3,6	3,6	3,9	4,2	4,2	4,5	4,8	4,1
SALVADOR (-12,55)	5,1	4,5	4,6	3,8	3,3	2,9	3,0	3,5	3,9	4,6	4,6	4,9

FUENTE: FAO.



Se puede reducir la información climática almacenada en el transcurso de los años, utilizando parámetros estadísticos que caracterizan la distribución interanual de los elementos medidos. Existen parámetros que indican la tendencia central, tales como la media aritmética; la normal que es una media aritmética "estabilizada", es decir, que se refiere a un gran número de años (por lo menos 30); la mediana. Otros parámetros caracterizan la dispersión de la distribución, tales como la amplitud de variación (diferencia entre el valor más grande y más pequeño de la serie), la desviación estándar o el coeficiente de variación (cociente de la desviación estándar por la media, expresado en porcentaje).

2. El Análisis Frecuencial

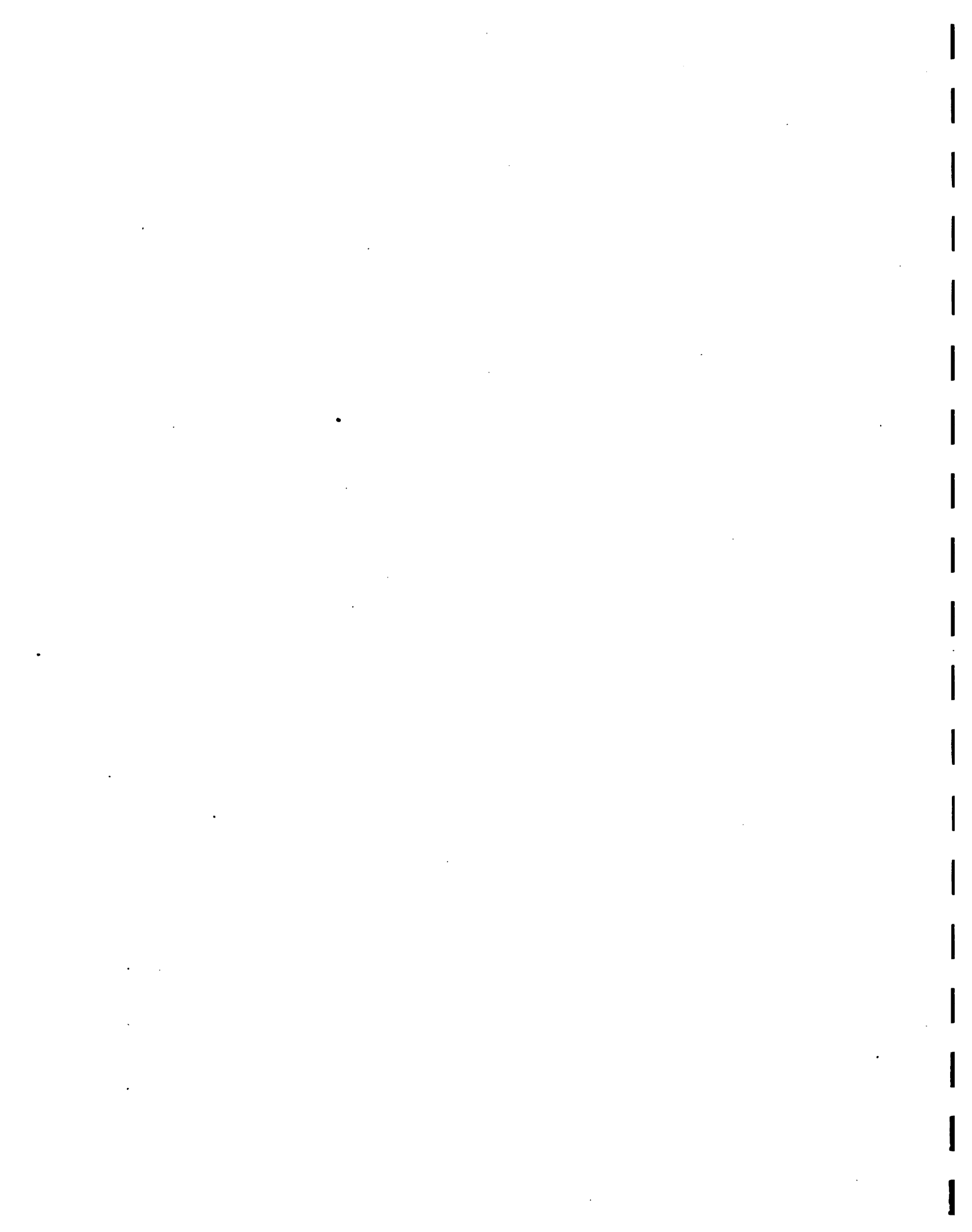
Un promedio tiene un significado práctico real solamente si no existe una dispersión de los datos demasiado grande alrededor de él; es decir, si el coeficiente de variación es bajo. Si la dispersión es importante, sólo el análisis frecuencial puede dar una idea de las características de la serie.

El análisis frecuencial aplicado a los datos climáticos permite resolver generalmente dos tipos de problema:

-fijándose un valor como umbral se busca la frecuencia con la cual este umbral es superado o no-superado. Por ejemplo, se puede buscar, para un mes dado, en un lugar determinado, con qué frecuencia la lluvia supera la ETP, interpretándose esta frecuencia como el número probable de años en que puede ocurrir el fenómeno cada diez años.

-el problema inverso consiste en fijarse una frecuencia de superación o no-superación y buscar el valor de la magnitud correspondiente. Por ejemplo, cuál es la cantidad de lluvia que se puede esperar con la probabilidad 0,75 (es decir, 3 años cada 4).

Para contestar a estas preguntas existen dos maneras de procesar los datos históricos: la manera matemática y la manera empírica:

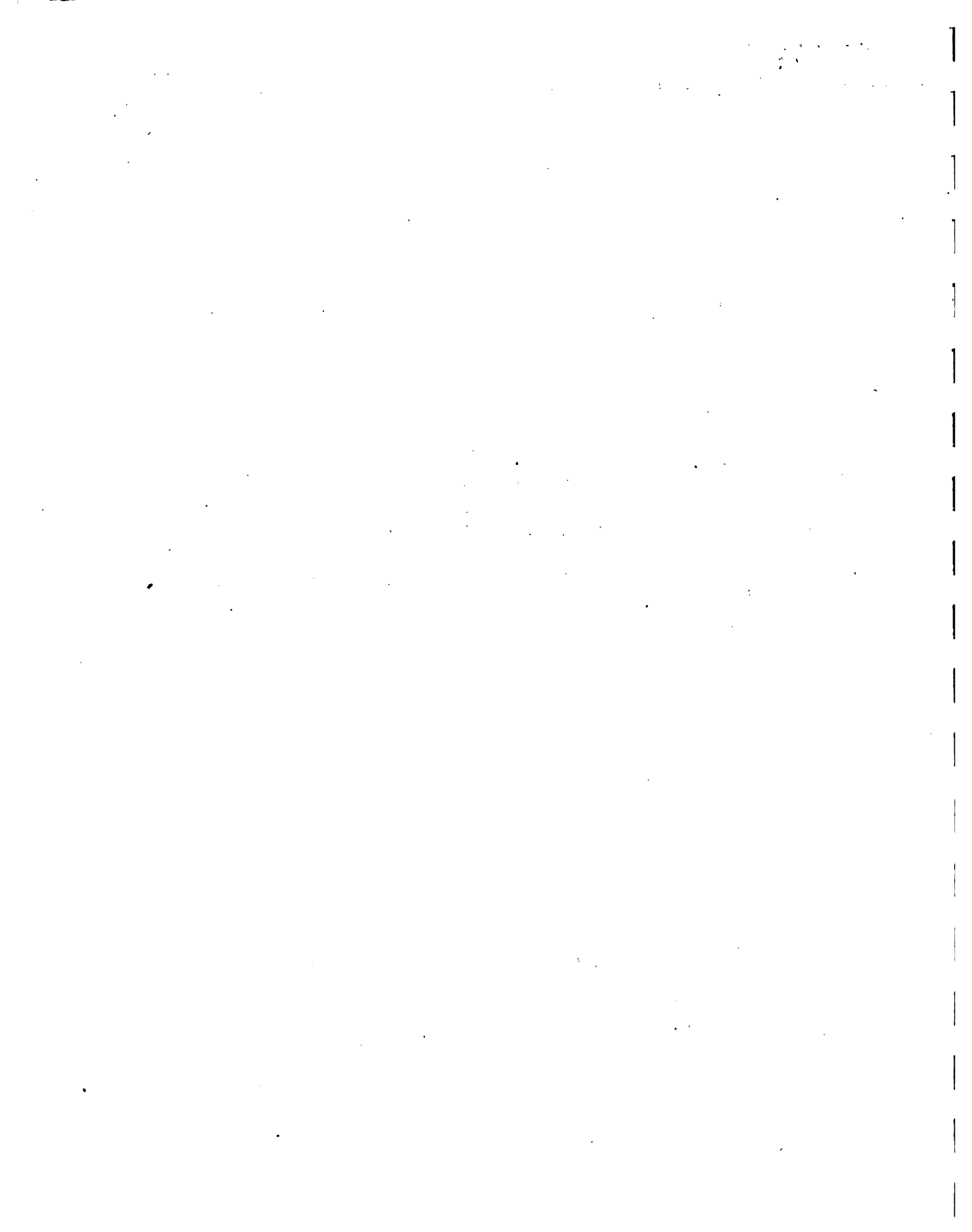


-La manera matemática consiste en ajustar leyes teóricas de pro
babilidad a la muestra considerada y luego utilizar las expre
siones matemáticas obtenidas para calcular las probabilidades
o los umbrales buscados.

-La manera empírica consiste en calcular directamente, a partir
de la muestra, los umbrales o las frecuencias.

F. CONCLUSION

En el trópico húmedo los diferentes parámetros que sirven para caracter
izar el clima no tienen la misma importancia con respecto al sector
agropecuario. Los factores hídricos, y la lluvia particularmente,
juegan un papel mucho más importante que los demás factores, tales
como la duración del día o las características del aire; la temperatu
ra, por ejemplo no varía mucho en el transcurso del año y se mantiene
muy por encima de los umbrales críticos.



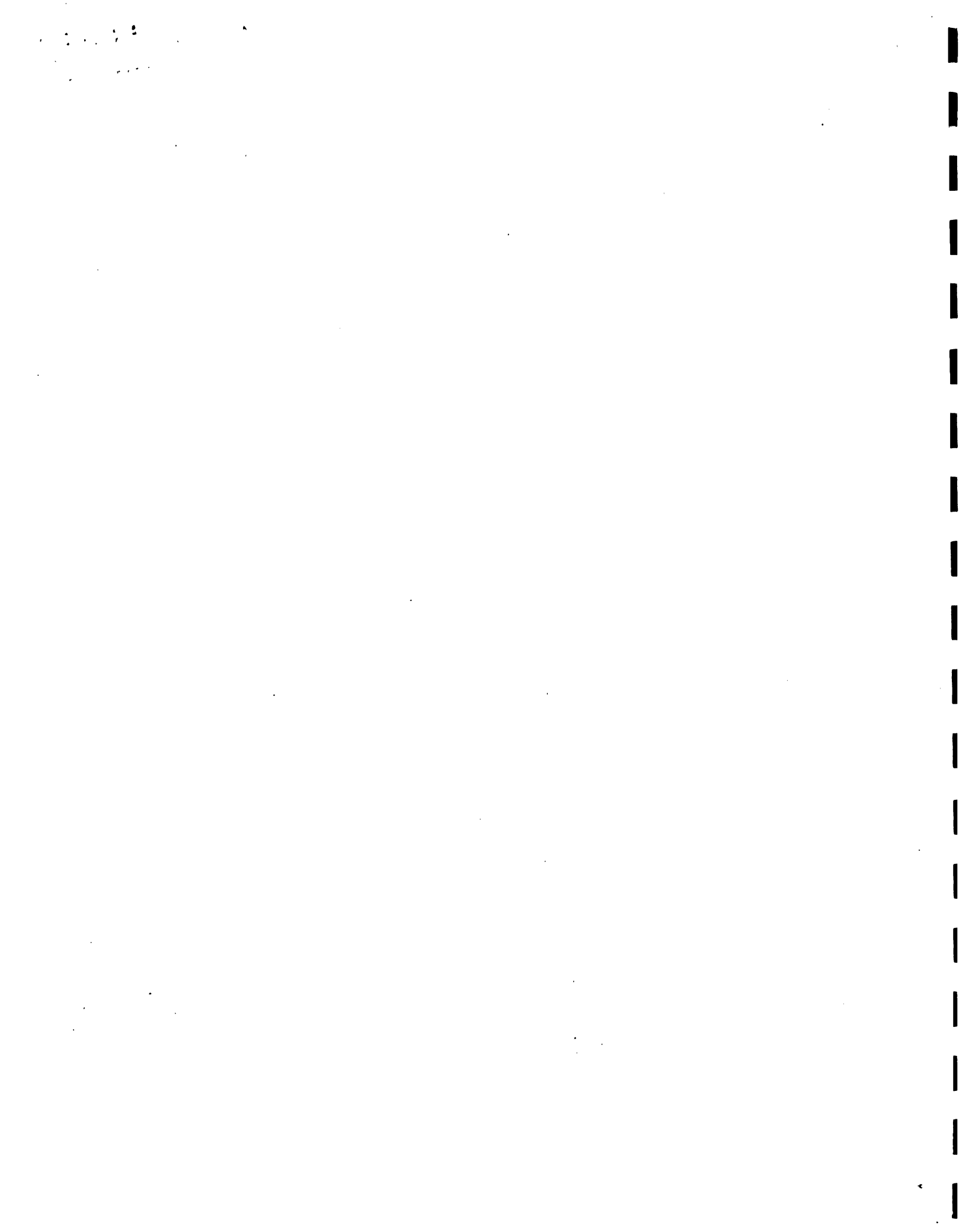
**NOCIONES GENERALES SOBRE LA
EVAPOTRANSPIRACION
Y LAS TRANSFERENCIAS DE AGUA**

Oscar E. Rojas

SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO

—○—
INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA
LA AGRICULTURA
IICA

SAN JOSE, COSTA RICA
AGOSTO, 1987



**NOCIONES GENERALES SOBRE LA
EVAPOTRANSPIRACION
Y LAS TRANSFERENCIAS DE AGUA**

Oscar E. Rojas

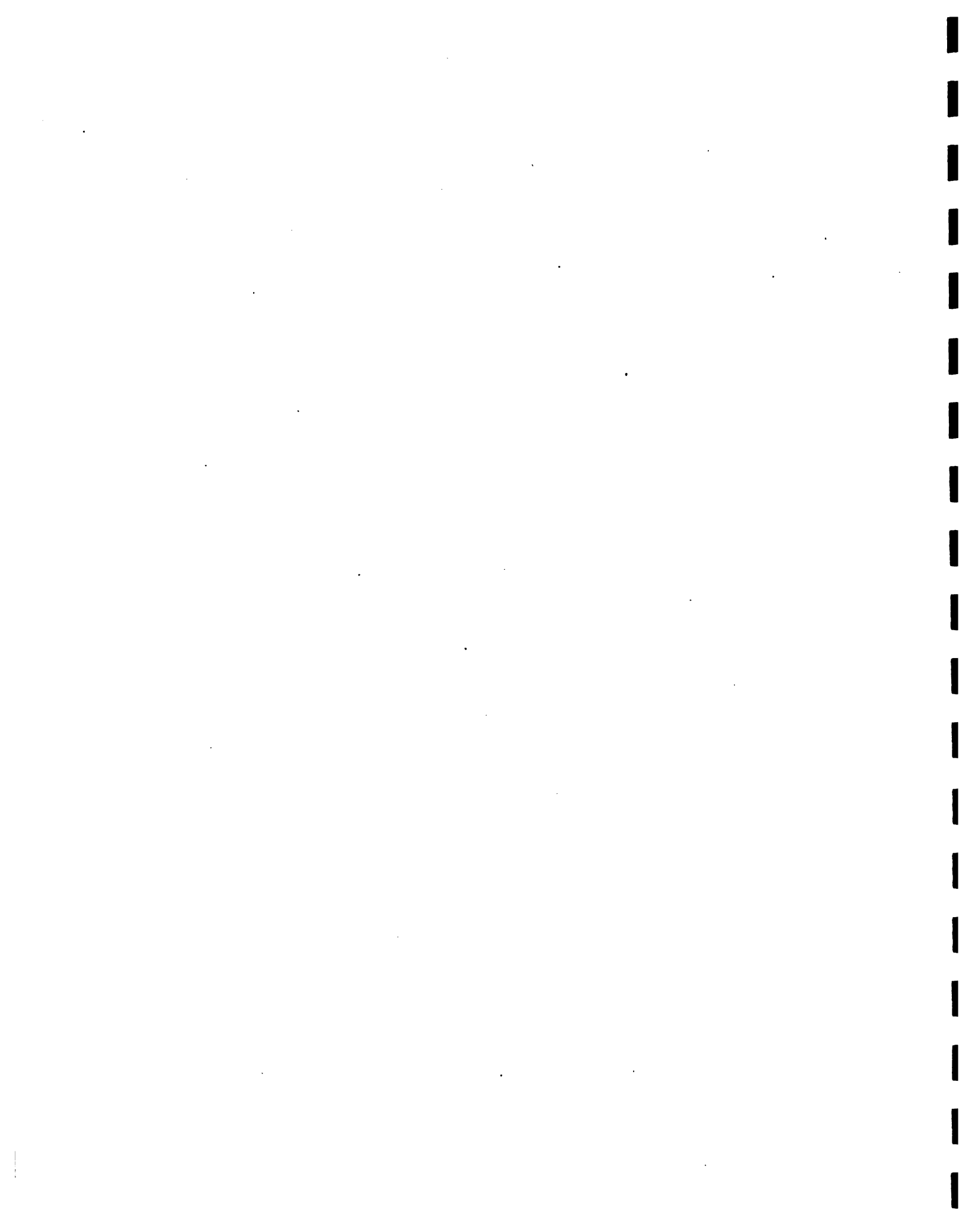
SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO

—○—
INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA
LA AGRICULTURA

IICA

SAN JOSE, COSTA RICA

AGOSTO, 1987



NOCIONES GENERALES SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACION
Y LAS TRANSFERENCIAS DE AGUA

Oscar E. Rojas*

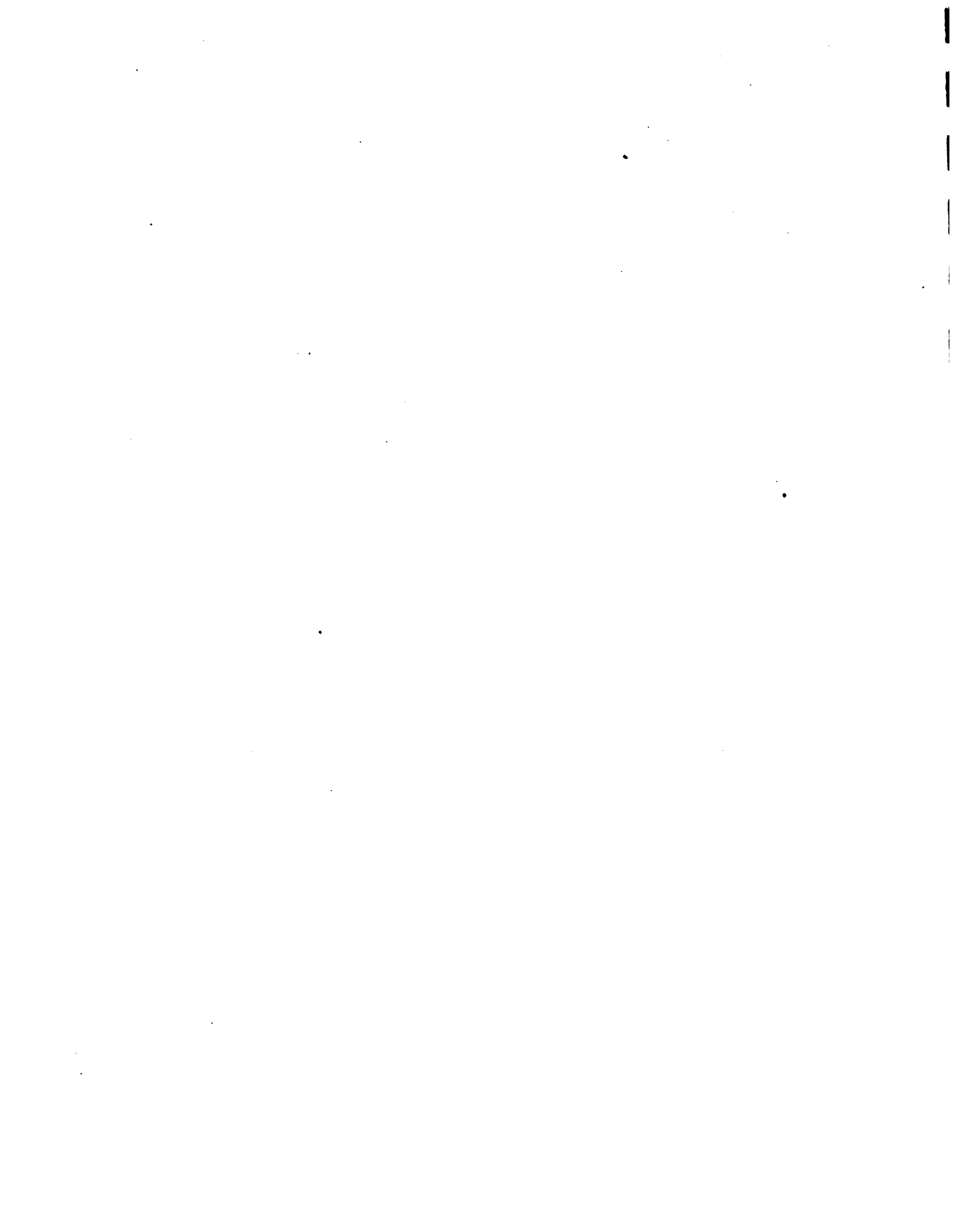
I. Conceptos de la evapotranspiración y de la evapotranspiración potencial

El vapor de agua atmosférico proveniente casi exclusivamente del proceso de evaporación que se realiza a nivel de la superficie de nuestro planeta por diversas reacciones fitoquímicas (respiración, combustión, etc.), contribuye sólo en una pequeña proporción al enriquecimiento del contenido total de agua en la atmósfera. La mayor proporción de esta evaporación, alrededor de un 85%, se sitúa a nivel de los océanos; sin embargo, una proporción no despreciable del orden de un 15% se produce a nivel de las superficies continentales. La vegetación juega una función preponderante en esta transferencia de vapor de agua; la planta se comporta como una mecha entre el subsuelo, la reserva hídrica y la atmósfera (BROCHET, P. y GERBIER, N., 1975). Con el término "evapotranspiración" se designa la cantidad de vapor de agua que es disipada en la atmósfera, e incluye tanto la evaporación del agua del suelo (fenómeno físico), como la transpiración de la vegetación (fenómeno fisiológico).

Cuando se considera un cultivo bien desarrollado, que cubre bien el suelo con un buen abastecimiento en agua, es decir, que el cultivo pueda disponer sin restricción de una reserva hídrica abundante para responder de la mejor manera a la demanda del medio, la evapotranspiración crece y tiende a su límite máximo, que se puede considerar como evapotranspiración potencial (ETP).

Durante mucho tiempo se ha considerado que el valor de la ETP era el mismo para todos los tipos de vegetación, ésto es la "hipótesis ETP", basada en la noción de un requerimiento hídrico, a la cual serían sometidas las coberturas vegetales por parte del clima, independientemente de su naturaleza.

* Ingeniero Agrónomo, D.A.A. INA Paris-Grignon



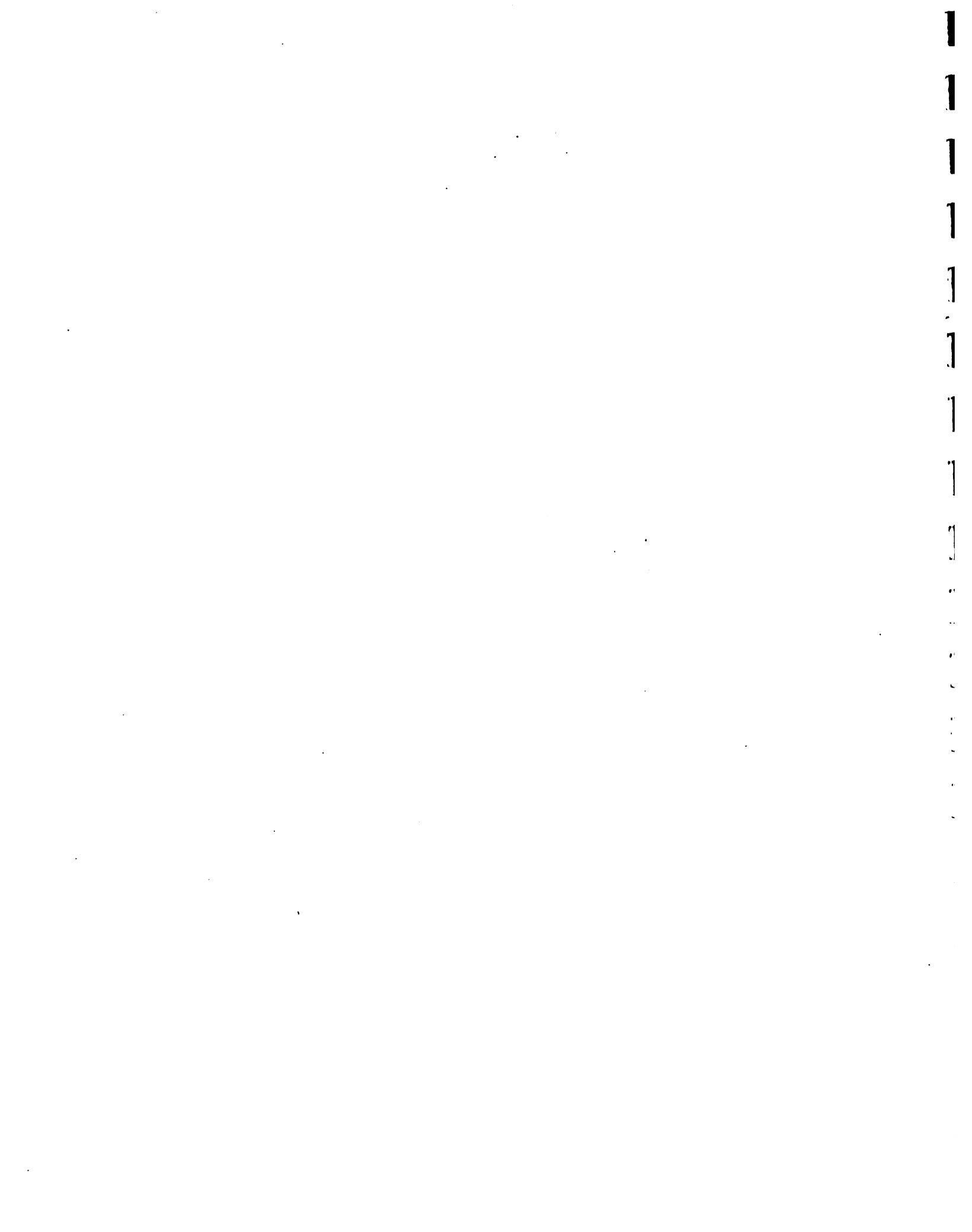
Este aspecto esencialmente climático de la ETP es aceptable cuando se trata de grandes superficies; sin embargo, resultados de estudios y medidas realizadas al respecto durante los últimos veinte años han demostrado que a una escala espacial más reducida, del orden de la parcela, por ejemplo, la ETP se encuentra muy relacionada al clima, pero también depende:

- del medio natural alrededor de la parcela,
- del tipo de cultivo de la parcela,
- de las propiedades pedológicas del suelo.

Para superficies limitadas, cubiertas por un cultivo homogéneo, se debe hacer la distinción entre la ETP, parámetro del clima, y la evapotranspiración máxima, característica específica de la especie cultivada, que depende mucho del estado fenológico del vegetal considerado, de su índice foliar y de su estado fisiológico.

Las fórmulas utilizadas para calcular la ETP, a partir de los datos climáticos, tienden a suavizar los accidentes. La comparación entre los resultados de cálculos parecidos dan diferencias a veces inquietantes, que podrían llegar para una misma década a 50% de desviación. Pareciera que ciertas expresiones son sólo aplicables a un tipo de clima particular. La causa de estas inexactitudes, dentro de los resultados de las ETP calculadas, está en relación directa con las hipótesis simplificadoras que se han adoptado y que subestiman la variación de uno u otro de los factores climáticos susceptibles de intervenir; siendo éstos:

- la radiación neta, resultado del balance entre la radiación global solar, la radiación de la atmósfera y la de la Tierra
- la temperatura del aire: consecuencia directa de ese balance
- el déficit de saturación ($e_w - e$)
- los movimientos del aire, tanto verticales como horizontales, responsables de los cambios por conducción, convección y turbulencia.



II. Aspectos energéticos y climáticos de la ETP

La evaporación consume energía, por lo tanto, se concibe que la cantidad de energía disponible a nivel de la superficie evaporante, suelo y vegetación, sea un factor limitante del fenómeno. La demanda de la atmósfera dependerá, por lo tanto, de la fracción disponible de la energía total puesta en juego para los intercambios termoradiativos globales. Sobre un período de 24 horas, o de un número entero de días, este balance se puede expresar de la siguiente manera:

$$R_g (1 - a) + R_a + LC = LE + R_t \pm Q$$

R_g = radiación global de longitudes de onda corta

R_a = radiación de la atmósfera (espectro I.R.)

R_t = radiación de la superficie: suelo, plantas, etc. (espectro I.R.)

a = albedo de la superficie

C = condensaciones

E = evapotranspiración

Q = energía advectiva

L = calor latente de evaporación o de condensación

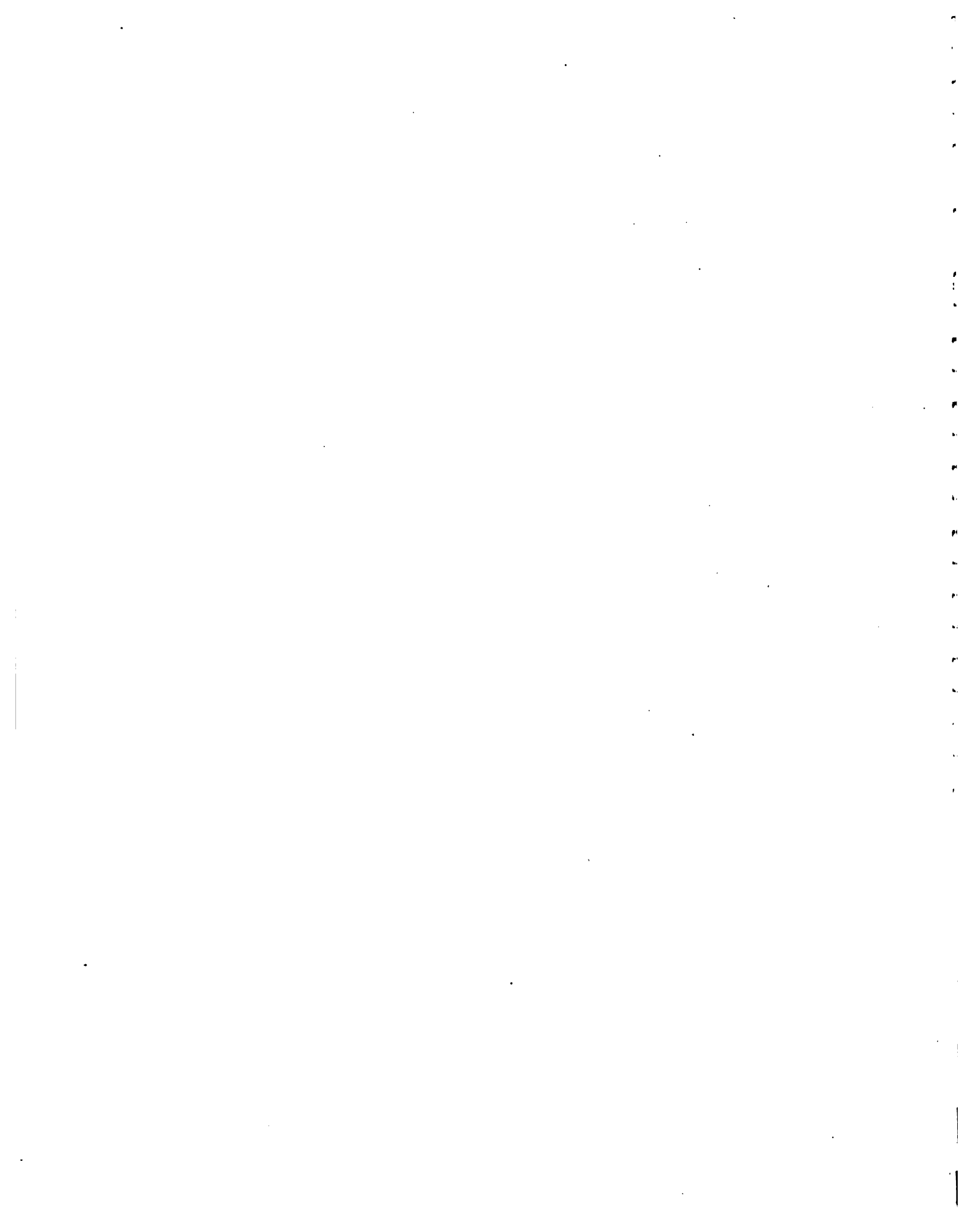
Si R_n representa la radiación neta resultante de ese balance radiativo:

$$R_n = R_g (1 - a) + R_a - R_t$$

Se puede escribir:

$$R_n = LE - LC \pm Q$$

El término $L(E - C)$ expresa el balance parcial de energía, relativo al intercambio del agua entre el suelo, la vegetación y la atmósfera. Representa, a la vez, la cantidad de agua evaporable, durante un intervalo de tiempo definido, según la energía disponible para tal efecto, siendo, por lo tanto, una expresión de la evapotranspiración potencial instantánea.



Se conoce que la ETP depende de los factores climáticos; por su lado, la evapotranspiración real absorbiendo energía, modifica las características físicas del aire y participa, por este hecho, en la restricción de la demanda del ambiente, ésto es de la ETP.

III. Aspecto bioclimático de la evapotranspiración

A nivel de las superficies aéreas de intercambio del cultivo, representadas esencialmente por las hojas, ciertos mecanismos fisiológicos son susceptibles de controlar el volumen de transferencias de vapor de agua entre el tejido del vegetal y su medio.

Una pequeña fracción de estas transferencias se efectúa a través de la pared cuticular (de 0 a 30% del volumen total de intercambios), por el contrario, la mayor parte del vapor de agua transpirado se efectúa a través de los estomas de las hojas.

La resistencia a la difusión del vapor de agua, a nivel del estoma, es muy débil si éste está totalmente abierto, pero crece rápidamente cuando, bajo el efecto de un déficit hídrico, el estoma se cierra hasta la obturación completa. También, por esos estomas se efectúan otros intercambios gaseosos entre el tejido vegetal y el ambiente, en particular las transferencias del CO₂ de la atmósfera para el beneficio de las células clorofilianas. El CO₂ es indispensable para la fotosíntesis de hidrocarburos: celulosa, azúcar, almidón, etc., ésto es para la producción de materia seca.

Todo freno a estos intercambios provocará, por lo tanto, una reducción de la producción vegetal y, por consecuencia, una disminución de la rentabilidad del cultivo tratado. Así que, cada vez que la planta disminuya el nivel de la evapotranspiración por medio del cierre de sus estomas, habrá un efecto depresivo sobre la producción de materia seca. Los bioclimatólogos han puesto en evidencia la excelente correlación que existe entre el rendimiento en materia seca y la relación ETR/ETP, la cual puede considerarse como un índice representativo del cierre estomático (Fig. 1).



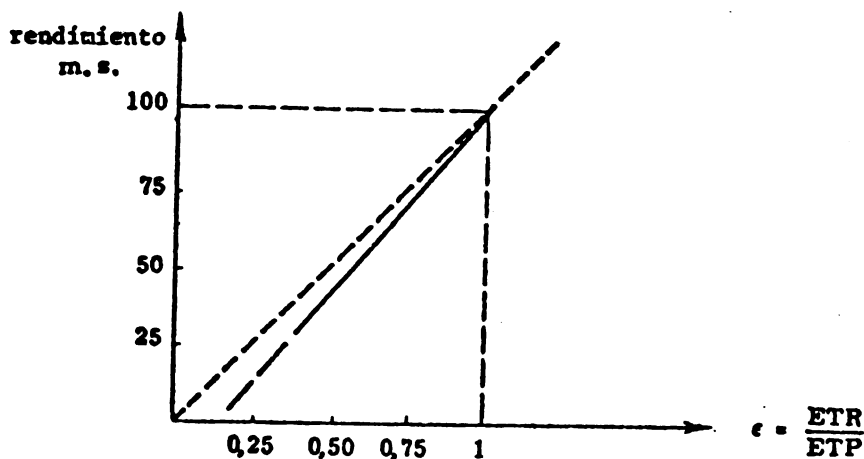
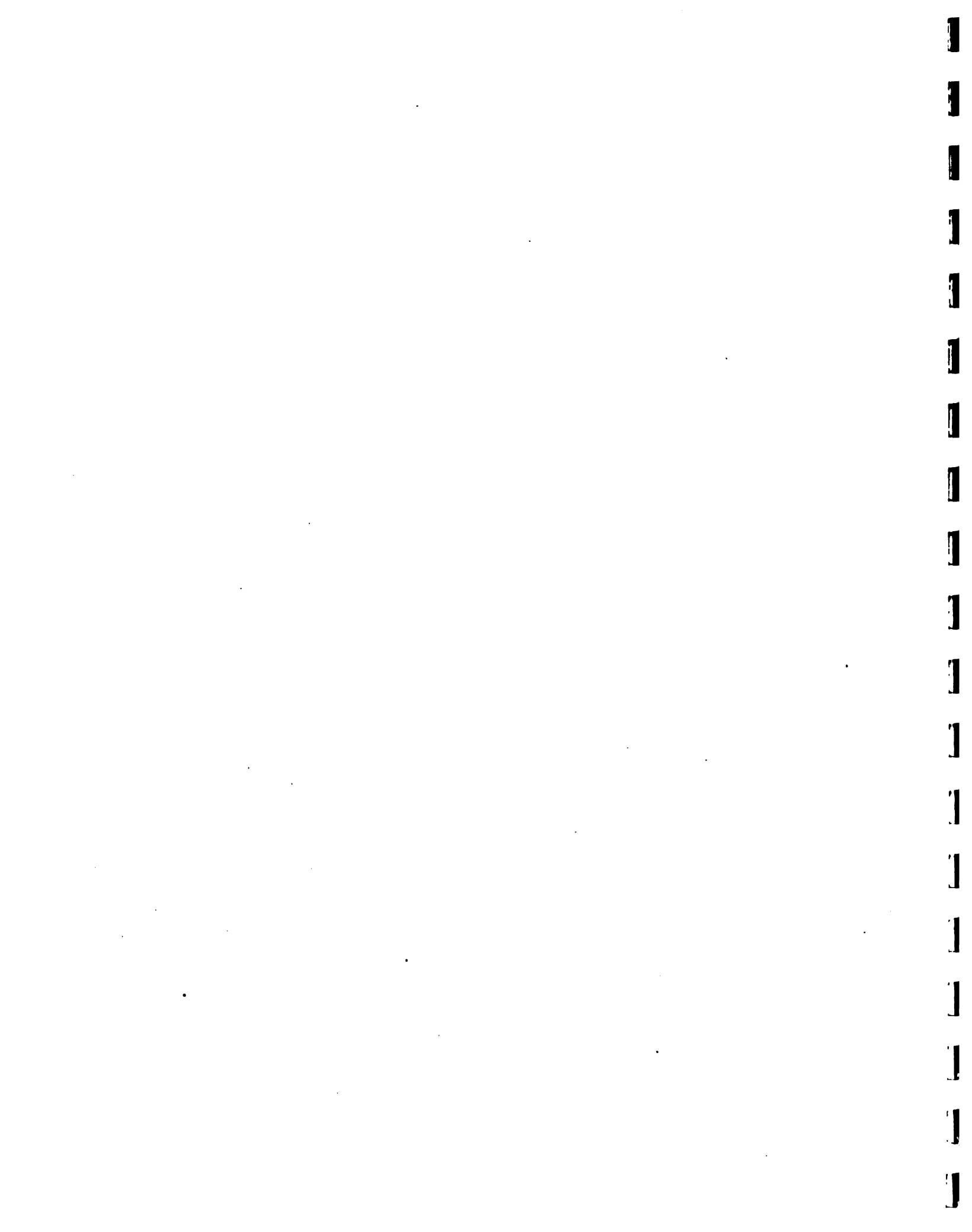


Fig. 1 - Relación entre el rendimiento en materia seca y la relación ETR/ETP (Robelin, 1967).

El flujo del agua a través de la planta depende igualmente del desarrollo y de la profundidad explorada por el sistema radical. Cualquier práctica cultural que trate de mejorar el desarrollo de las raíces, acentúa la posibilidad de una mayor evapotranspiración por parte de la planta (aereación y estructuración del suelo, lucha contra los parásitos y depredadores subterráneos, etc.). La cantidad máxima de agua "Q_x", transferible a través del vegetal, dependerá a la vez de su sistema foliar (evacuación) y de su sistema radical (absorción).

Cada vez que la ETP sobrepase el flujo máximo de agua Q_x, ya sea por una mayor demanda atmosférica, desecamiento del suelo o desarrollo radical insuficiente, habrá: una intervención de la regulación estomática, restricción de las superficies de intercambio y, por consecuencia, una reducción de la capacidad de producción de materia seca.

Por otra parte, a lo largo del día, la evapotranspiración potencial fluctúa grandemente, en función de la radiación neta, de la temperatura, del déficit de saturación y de la velocidad del viento,



elementos de clima que presentan todos una variación diurna importante. El mínimo cotidiano de la ETP se alcanza durante la noche.

En regiones templadas subhúmedas, por ejemplo, la temperatura mínima se acerca al punto de rocío, el déficit de saturación ($e_w - e$) se vuelve pequeño o casi nulo, por lo que la ETP tiende a cero.

Al contrario, esta ETP alcanza su valor máximo alrededor del medio día, que es el momento donde existe un excedente del balance radiativo neto y que coincide, generalmente, con el máximo del déficit de saturación (Fig. 2).

En los días soleados y secos, muy a menudo, las plantas sufren de un déficit hídrico sistemático en el transcurso del día y la regulación estomática tiene que intervenir. Durante el intervalo h_1 h_2 la fotosíntesis se reduce y la producción de materia seca se ve seriamente afectada.

Toda intervención que provoque un aumento de Q_x ($Q_x + \Delta Q$), o bien una disminución de la ETP (curva 3), disminuirá, o del todo suprimirá, el efecto depresivo que afecta la producción vegetal (h'_1 h'_2 en lugar de h_1 h_2) (Fig. 2).



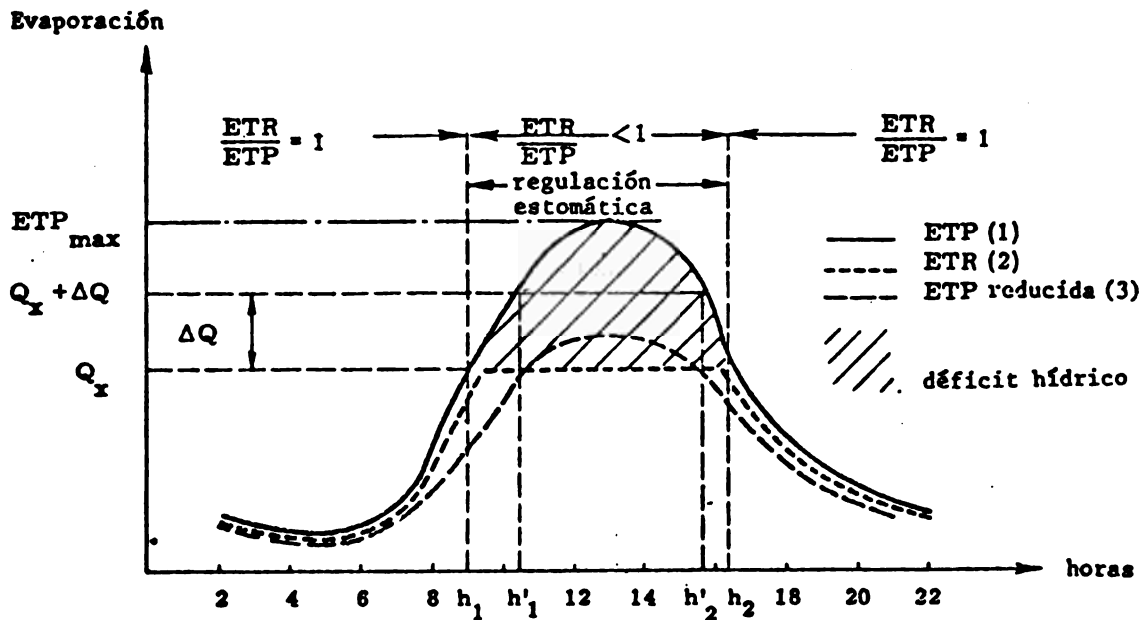
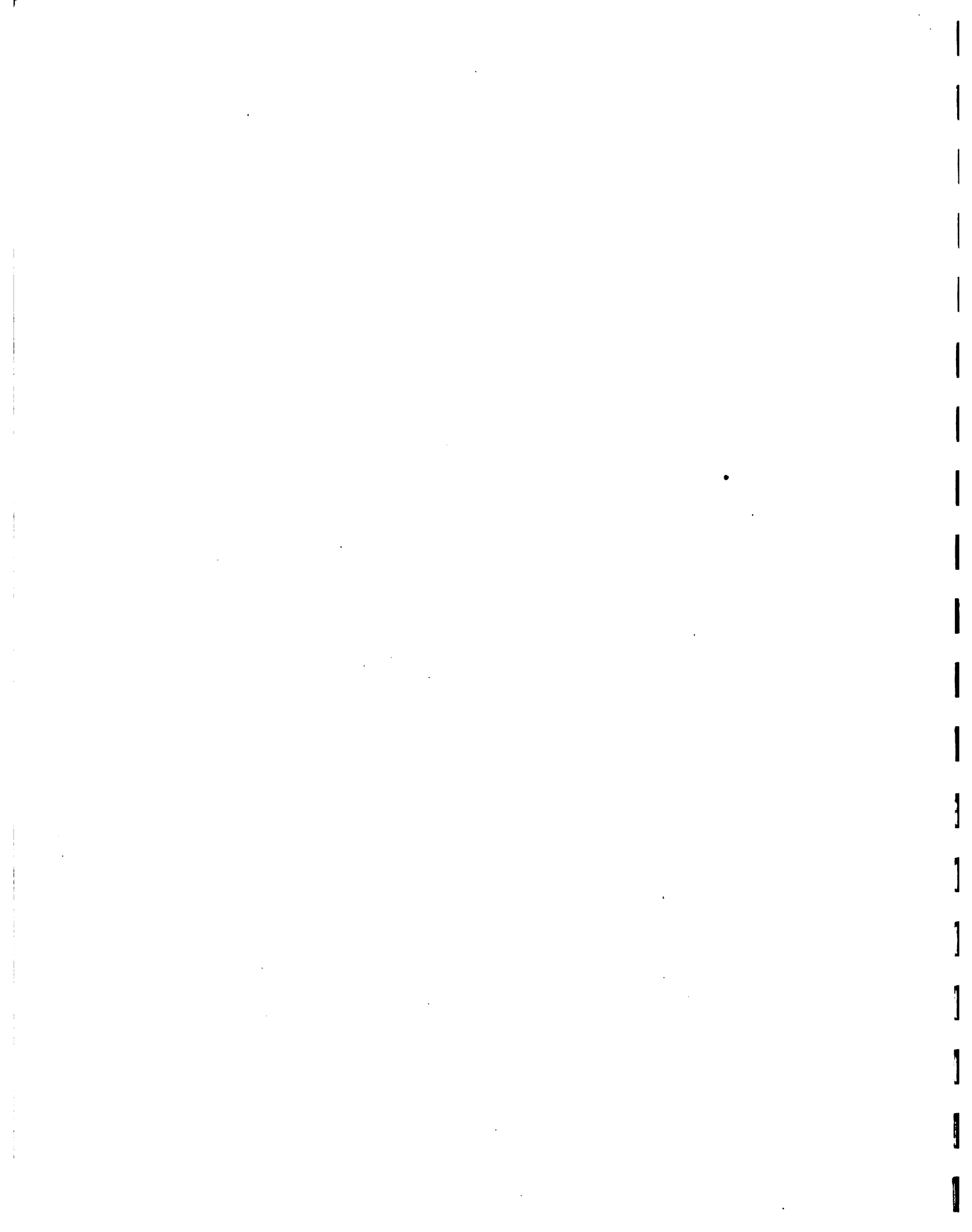


Fig. 2 - Evolución a lo largo del día de la ETP (Brochet, P. y Gerbier, N., 1975).

IV. Nociones relacionadas con el suelo

El suelo es un medio poroso, cuyos espacios vacíos pueden ser ocupados por el agua. El volumen total de espacios vacíos representa la porosidad que se subdivide en macroporosidad (macroporos) y en microporosidad (microporos o poros capilares).

Se puede considerar al suelo como una reserva de importancia variable, que se llena y se vacía según un cierto ritmo, y dentro de la cual el agua no se encuentra libre, sino sometida a un conjunto complejo de fuerzas variables (la fuerza de la gravedad, las fuerzas denominadas capilares, las fuerzas de adsorción), que determinan su retención, sus movimientos y finalmente su utilización por las plantas. Estas fuerzas dependen de numerosos factores, entre los cuales la talla de los poros juega un rol esencial (Boulaine, 1978).



4.1 Humedad del suelo

El suelo constituye un medio conveniente para las raíces, siempre que exista un equilibrio entre las tres fases (sólida, líquida y gaseosa). El aire es necesario para la respiración de las raíces y el agua les debe ser cedida sin dificultad. Por lo tanto, se distinguen diferentes niveles de humedad dentro del suelo que corresponden a las siguientes definiciones:

4.1.1 Humedad de saturación (HS)

Es la humedad del suelo cuando el agua ocupa toda la porosidad. Este no contiene más aire. Los poros gruesos son ocupados por el agua de gravedad.

4.1.2 Humedad a la capacidad de retención (HCR) o humedad a la capacidad de campo (HCC)

Es la humedad que contiene un suelo después de la desaparición del agua de gravedad; el agua restante ocupa la microporosidad (agua capilar). Ella es retenida dentro de las cavidades del suelo por las fuerzas de la tensión superficial. Estas fuerzas corresponden a alturas de ascensión capilar definidas por la ley de Jurin: de aproximadamente 1 metro para las arenas (poros de 15 micrones) hasta 10 metros para las arcillas (poros de 1,5 micrones).

4.1.3 Humedad equivalente (HE)

Esta medida se hace en el laboratorio. Se extrae el agua de una muestra de suelo saturado, por medio de una centrifugadora que produce una aceleración de 1000 veces la aceleración de la gravedad durante 30 minutos. La humedad del suelo después del tratamiento se aproxima a la humedad a la capacidad de retención.



4.1.4 Humedad crítica (HC)

Es la humedad del suelo debajo de la cual la planta comienza a sufrir de un déficit hídrico ($ETR < ETM$). Corresponde a una presión de succión dentro de la hoja de 8 a 10 atmósferas, pero no es un valor definido para el suelo.

Se ha comprobado que la humedad crítica es débil cuando la velocidad de desecación es lenta, es decir:

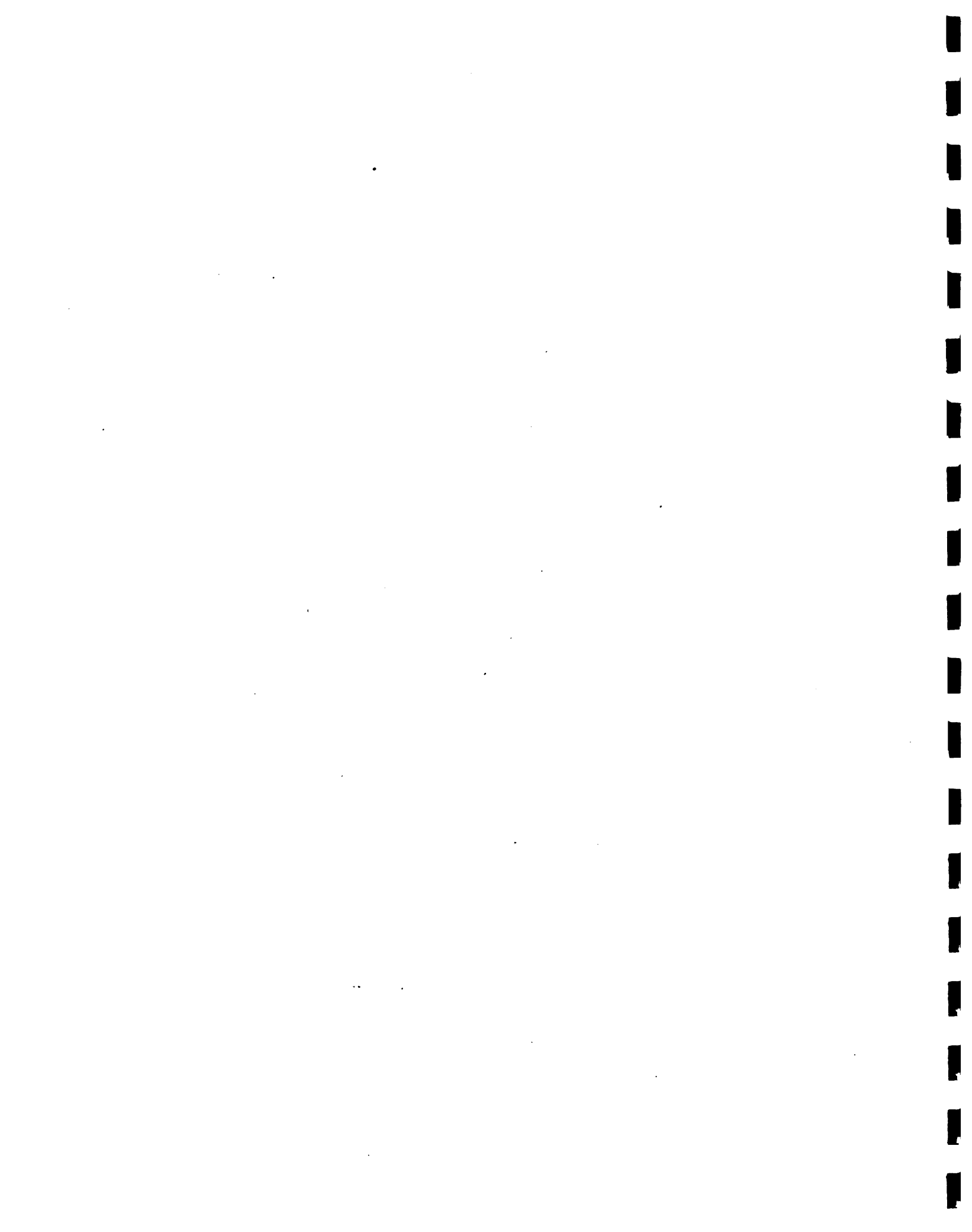
- cuando la evapotranspiración es menos fuerte
- cuando el volumen del suelo explorado es más importante (sistema radical bien desarrollado y en buen estado).

Este valor de humedad es, por consiguiente, una noción importante; sin embargo, es sumamente fluctuante, porque ella no depende solamente del suelo, sino también del clima y de las características de la planta.

4.1.5 Humedad al punto de marchitez permanente (HPM)

Es la humedad debajo de la cual la planta sufre de daños irreversibles causados por la sequía. En este momento, la fuerza de succión del suelo se equilibra con la fuerza de succión de las células de las raíces: el flujo de agua del suelo hacia la planta se anula. Es una noción igualmente variable y depende de la naturaleza de la planta.

Se ha adoptado por convención en definirla, como la presión de succión dentro del suelo correspondiente a 15 atmósferas, aún cuando ciertas plantas son capaces de extraer agua por medio de sus raíces a tensiones superiores.



4.1.6 Humedad higroscópica

El suelo puede secarse por debajo del punto de marchitez sin alcanzar una sequía total. Este valor de humedad corresponde a la cantidad de agua retenida por las partículas del suelo (agua "pelicular"), que se encuentran en equilibrio con el potencial hídrico medio de la atmósfera.

4.1.7 Agua de constitución

Se denomina así a las moléculas de agua atrapadas dentro de las estructuras químicas de los constituyentes del suelo. Ellas son liberadas solamente a altas temperaturas (450°C o más).

Las características hídricas del suelo están, como se ha visto, estrechamente ligadas a su naturaleza mineralógica y a las condiciones pedológicas; siendo esencialmente las características físicas (textura, estructura) las que condicionan su comportamiento en relación al agua.

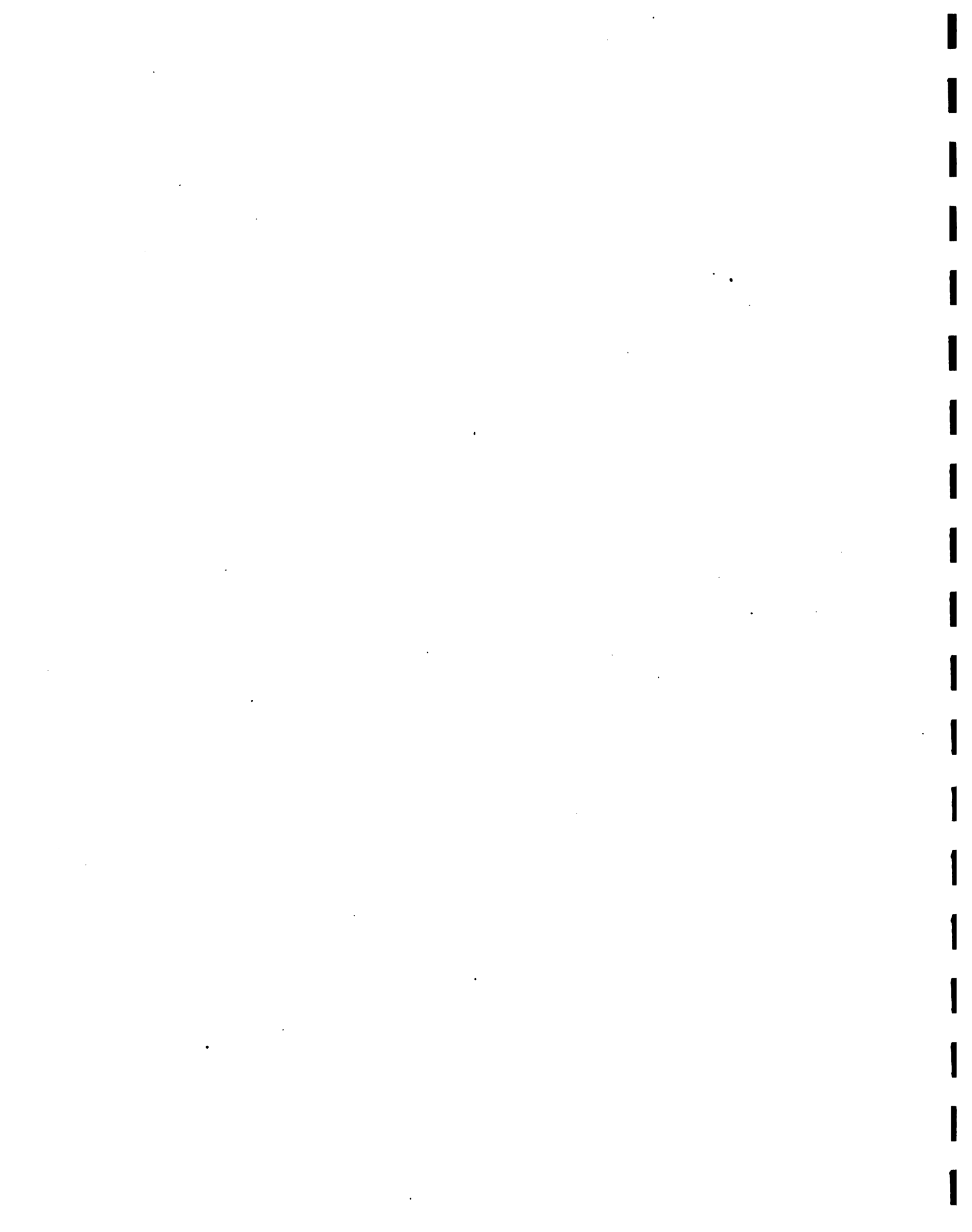
V. La reserva de agua en el suelo

La cantidad de agua máxima disponible dentro del suelo para la planta depende:

- de las características del suelo (principalmente de HCR y HPM)
- de la profundidad Z del suelo explotada por la planta (aproximadamente la profundidad alcanzada por las raíces).

5.1 Reserva útil

La reserva útil, RU, es el valor máximo de agua dentro del suelo disponible para la planta.



$$RU = da \cdot (HCR - HPM) \cdot Z$$

con:

RU = reserva útil en mm

da = densidad aparente de la tierra seca^{1/}

HCR = humedad ponderal^{2/} a la capacidad de retención (en %)

HPM = humedad ponderal al punto de marchitez permanente
(en %)

Z = espesor del trozo de suelo correspondiente a la profundidad promedio de las raíces

5.2 Reserva fácilmente utilizable (RFU)

La reserva fácilmente utilizable es la fracción de la RU disponible a una tensión suficientemente débil como para que la planta transpire a la ETM.

$$RFU = da (HCR - HC) Z$$

con:

RFU = reserva fácilmente utilizable (en mm)

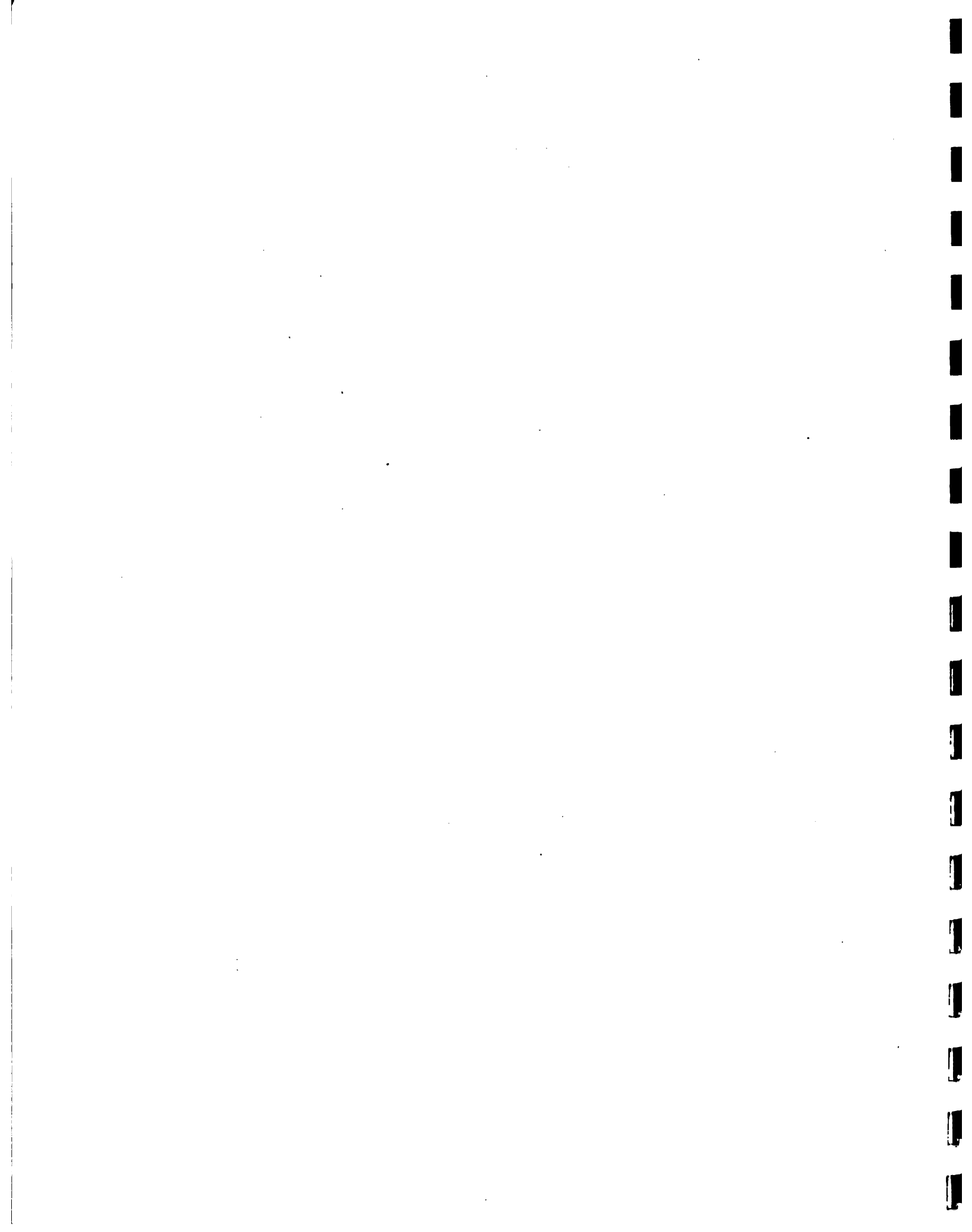
HCR = humedad ponderal a la capacidad de retención (en %)

HC = humedad crítica ponderal (en %)

Z = espesor del trozo de suelo correspondiente a la profundidad promedio de las raíces

1/ Se denomina densidad aparente de un suelo a la masa del suelo seco por unidad del volumen del suelo in situ, $da = M_s/V$.

2/ La humedad ponderal es definida por la relación $Hp\% = (\text{Peso de suelo húmedo} - \text{Peso del suelo seco}) / \text{Peso del suelo seco} \times 100$.



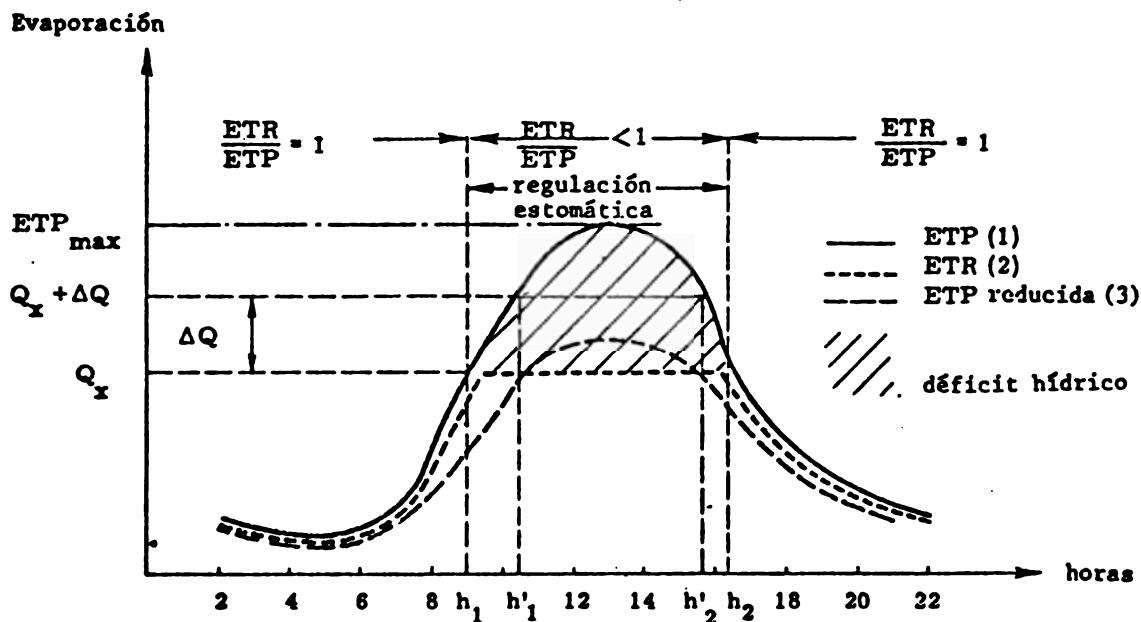


Fig. 2 - Evolución a lo largo del día de la ETP (Brochet, P. y Gerbier, N., 1975).

IV. Nociones relacionadas con el suelo

El suelo es un medio poroso, cuyos espacios vacíos pueden ser ocupados por el agua. El volumen total de espacios vacíos representa la porosidad que se subdivide en macroporosidad (macroporos) y en microporosidad (microporos o poros capilares).

Se puede considerar al suelo como una reserva de importancia variable, que se llena y se vacía según un cierto ritmo, y dentro de la cual el agua no se encuentra libre, sino sometida a un conjunto complejo de fuerzas variables (la fuerza de la gravedad, las fuerzas denominadas capilares, las fuerzas de adsorción), que determinan su retención, sus movimientos y finalmente su utilización por las plantas. Estas fuerzas dependen de numerosos factores, entre los cuales la talla de los poros juega un rol esencial (Boulaine, 1978).



4.1 Humedad del suelo

El suelo constituye un medio conveniente para las raíces, siempre que exista un equilibrio entre las tres fases (sólida, líquida y gaseosa). El aire es necesario para la respiración de las raíces y el agua les debe ser cedida sin dificultad. Por lo tanto, se distinguen diferentes niveles de humedad dentro del suelo que corresponden a las siguientes definiciones:

4.1.1 Humedad de saturación (HS)

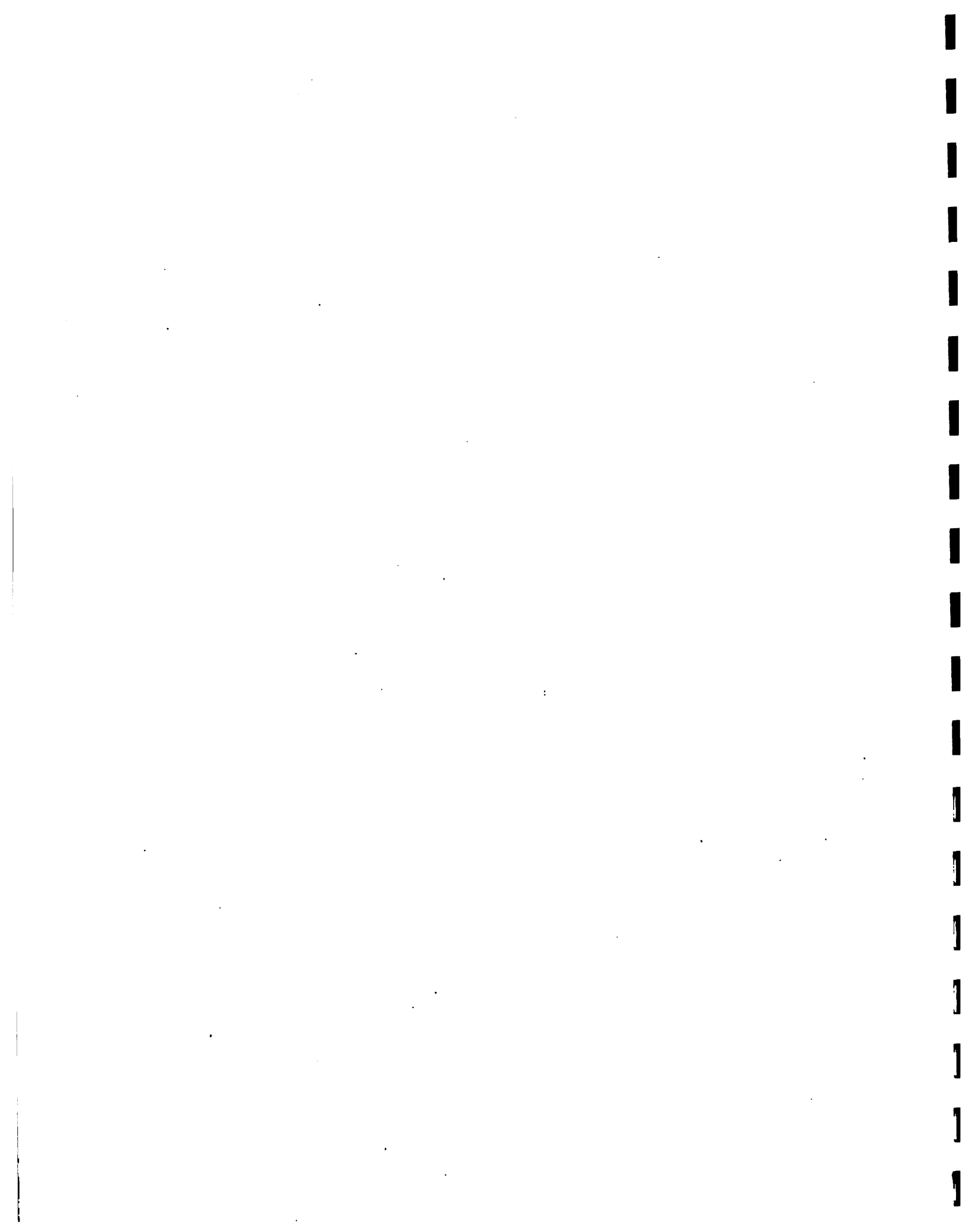
Es la humedad del suelo cuando el agua ocupa toda la porosidad. Este no contiene más aire. Los poros gruesos son ocupados por el agua de gravedad.

4.1.2 Humedad a la capacidad de retención (HCR) o humedad a la capacidad de campo (HCC)

Es la humedad que contiene un suelo después de la desaparición del agua de gravedad; el agua restante ocupa la microporosidad (agua capilar). Ella es retenida dentro de las cavidades del suelo por las fuerzas de la tensión superficial. Estas fuerzas corresponden a alturas de ascensión capilar definidas por la ley de Jurin: de aproximadamente 1 metro para las arenas (poros de 15 micrones) hasta 10 metros para las arcillas (poros de 1,5 micrones).

4.1.3 Humedad equivalente (HE)

Esta medida se hace en el laboratorio. Se extrae el agua de una muestra de suelo saturado, por medio de una centrifugadora que produce una aceleración de 1000 veces la aceleración de la gravedad durante 30 minutos. La humedad del suelo después del tratamiento se aproxima a la humedad a la capacidad de retención.



4.1.4 Humedad crítica (HC)

Es la humedad del suelo debajo de la cual la planta comienza a sufrir de un déficit hídrico ($ETR < ETM$). Corresponde a una presión de succión dentro de la hoja de 8 a 10 atmósferas, pero no es un valor definido para el suelo.

Se ha comprobado que la humedad crítica es débil cuando la velocidad de desecación es lenta, es decir:

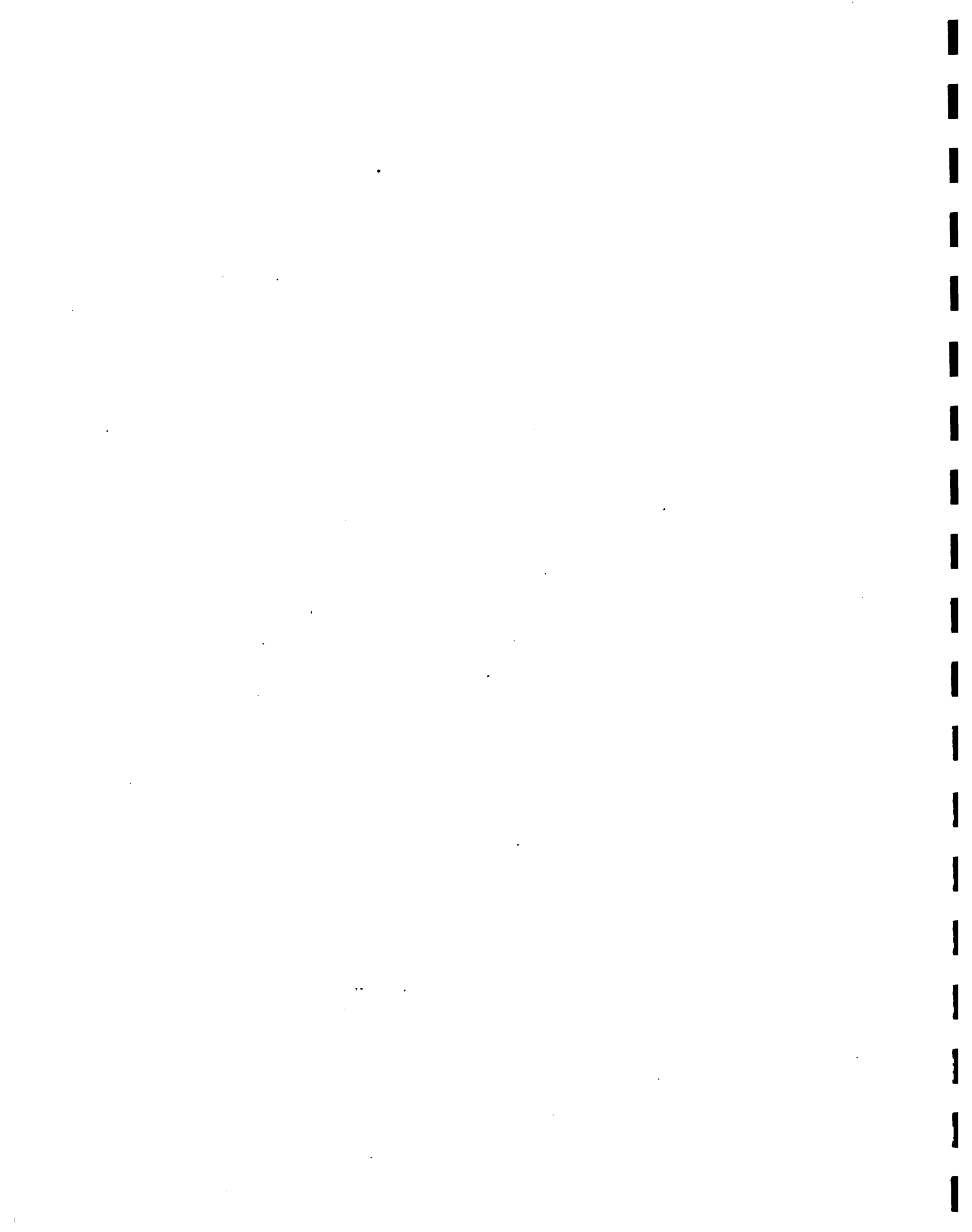
- cuando la evapotranspiración es menos fuerte
- cuando el volumen del suelo explorado es más importante (sistema radical bien desarrollado y en buen estado).

Este valor de humedad es, por consiguiente, una noción importante; sin embargo, es sumamente fluctuante, porque ella no depende solamente del suelo, sino también del clima y de las características de la planta.

4.1.5 Humedad al punto de marchitez permanente (HPM)

Es la humedad debajo de la cual la planta sufre de daños irreversibles causados por la sequía. En este momento, la fuerza de succión del suelo se equilibra con la fuerza de succión de las células de las raíces: el flujo de agua del suelo hacia la planta se anula. Es una noción igualmente variable y depende de la naturaleza de la planta.

Se ha adoptado por convención en definirla, como la presión de succión dentro del suelo correspondiente a 15 atmósferas, aún cuando ciertas plantas son capaces de extraer agua por medio de sus raíces a tensiones superiores.



4.1.6 Humedad higroscópica

El suelo puede secarse por debajo del punto de marchitez sin alcanzar una sequía total. Este valor de humedad corresponde a la cantidad de agua retenida por las partículas del suelo (agua "pelicular"), que se encuentran en equilibrio con el potencial hídrico medio de la atmósfera.

4.1.7 Agua de constitución

Se denomina así a las moléculas de agua atrapadas dentro de las estructuras químicas de los constituyentes del suelo. Ellas son liberadas solamente a altas temperaturas (450°C o más).

Las características hídricas del suelo están, como se ha visto, estrechamente ligadas a su naturaleza mineralógica y a las condiciones pedológicas; siendo esencialmente las características físicas (textura, estructura) las que condicionan su comportamiento en relación al agua.

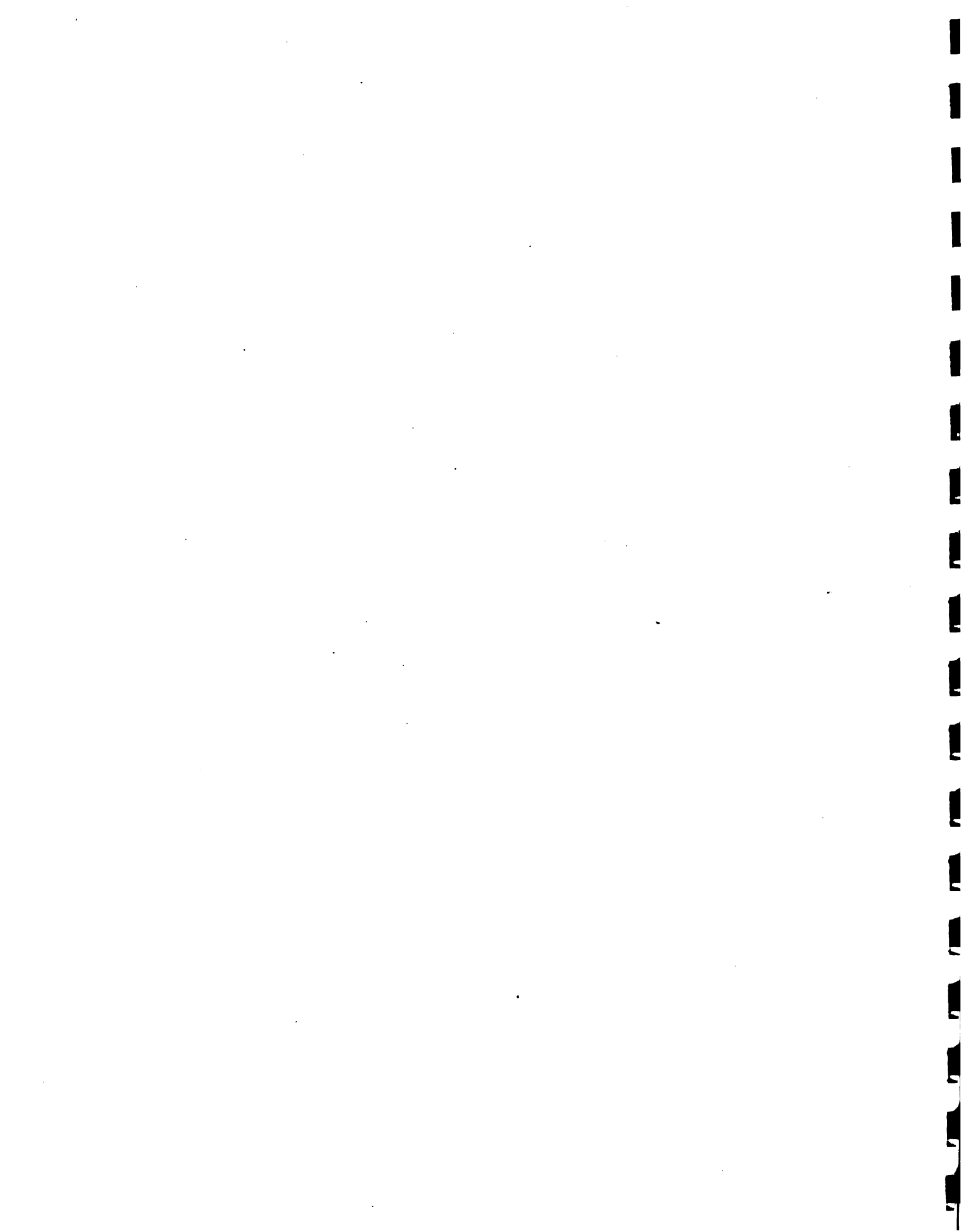
V. La reserva de agua en el suelo

La cantidad de agua máxima disponible dentro del suelo para la planta depende:

- de las características del suelo (principalmente de HCR y HPM)
- de la profundidad Z del suelo explotada por la planta (aproximadamente la profundidad alcanzada por las raíces).

5.1 Reserva útil

La reserva útil, RU, es el valor máximo de agua dentro del suelo disponible para la planta.



En la práctica es difícil de obtener una buena estimación de HC, por lo que se ha preferido estimarla a partir de la RU.

$$RFU = a \text{ RU}$$

con:

$$0,5 \leq a < 1$$

Estas nociones nos inducen a considerar, esquemáticamente, al suelo como una reserva donde una parte está disponible a voluntad (RFU) y donde el resto, denominada reserva difícilmente utilizable (RDU), se hace cada vez más racionada conforme se acerca al agotamiento.

Las modalidades de este racionamiento han sido estudiadas por Hallaire, (1964), sobre muestras de suelos en el laboratorio. Los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 3.

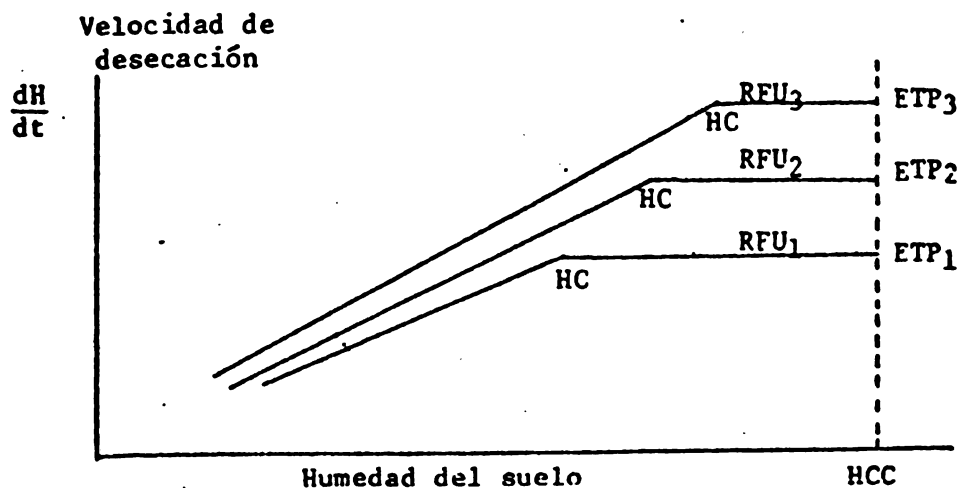


Fig. 3 - Velocidad de desecación para un mismo suelo en función de su humedad para diferentes niveles de evapotranspiración



En condiciones de evaporación continua y uniforme, la velocidad de desecación del suelo (dH/dt) es constante mientras no se descienda por debajo de la humedad crítica; debajo de este valor, la velocidad de desecación decrece regularmente.

Hemos observado que la noción de humedad crítica es fluctuante, la noción de la RFU también lo es. Para un mismo suelo, la RFU decrece cuando la velocidad de desecación aumenta; por el contrario, esta crece cuando el sistema radical se densifica.



BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BROCHET, P. et GERBIER, N. (1975). L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie No. 65, Météorologie Nationale. 96 p.

BOULAIN, J. (1978). Cours d'hydropédologie. Institut National Agronomique. Paris-Grignon, France. 193 p.

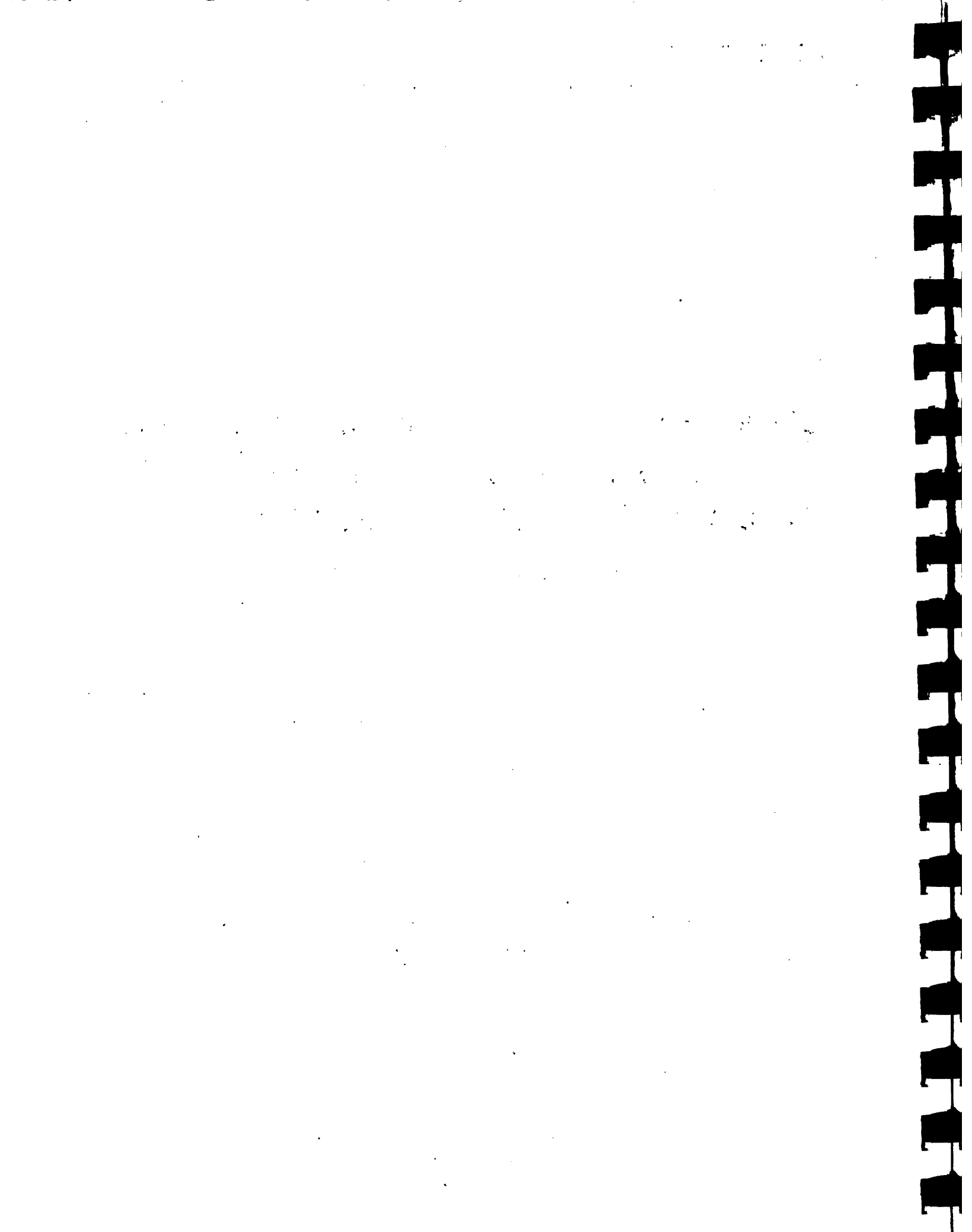
HALLAIRE, M. et al (1964). L'eau et la production végétale. Institut National de la Recherche Agronomique. Versailles, France.

LHOMME, J.P. y ROJAS, O.E. (1984). Elementos de Agroclimatología. IICA-ORSTOM. Serie Publicaciones Misceláneas No. 531. Costa Rica. 92 p.

PENMAN, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A., Vol. 193. pp. 120-144.

ROBELIN, M. (1967). Etude de la sensibilité du maïs à la sécheresse. Période critique de sensibilité. C. R. Acad. Agric.

ROJAS, O.E. (1985). Estudio de las condiciones hídricas del Pacífico Norte de Costa Rica. IICA. Serie Publicaciones Misceláneas No. 546. 73 p.



**DETERMINACION DE LA FECHA DE SIEMBRA
DE LOS CULTIVOS ANUALES
Y SU POSTERIOR ZONIFICACION
AGROECOLOGICA**

Oscar E. Rojas

**SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO**

**INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA
LA AGRICULTURA**

IICA

**SAN JOSE, COSTA RICA
OCTUBRE, 1987**



SEPSA

144

**DETERMINACION DE LA FECHA DE SIEMBRA
DE LOS CULTIVOS ANUALES
Y SU POSTERIOR ZONIFICACION
AGROECOLOGICA**

Oscar E. Rojas

SECRETARIA EJECUTIVA DE PLANIFICACION SECTORIAL
DE DESARROLLO AGROPECUARIO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA
LA AGRICULTURA

IICA

SAN JOSE, COSTA RICA

OCTUBRE, 1987



CONTENIDO

	<u>Página</u>
Presentación	
I. ANALISIS AGROCLIMATICO PARA DETERMINAR LA FECHA TEORICA DE SIEMBRA DE LOS CULTIVOS ANUALES EN LOS PAISES DE LA ZONA INTERTROPICAL.....	1
A. METODO UTILIZANDO LA PRECIPITACION AL 75 POR CIENTO.....	2
B. METODO UTILIZANDO EL ANALISIS FRECUENCIAL DE LLUVIAS.....	3
1. Necesidades hídricas del sorgo por fase fenológica.....	8
2. Aplicación práctica.....	14
II. ZONIFICACION AGROECOLOGICA DEL SORGO.....	18
A. DEFINICION DE LOS REQUERIMIENTOS AGROECOLOGICOS DEL CULTIVO (Primer Etapa).....	18
B. DEFINICION DE LA FECHA DE SIEMBRA MAS ADECUADA PARA EL CULTIVO (Segunda Etapa).....	20
C. DEFINICION DE LAS POTENCIALIDADES AGROCLIMATICAS DE PRODUCCION PARA EL CULTIVO (Tercera Etapa)....	27
D. ANALISIS DE LAS VARIABLES FISIOEDAFICAS EN RELACION AL CULTIVO (Cuarta Etapa).....	32
E. SINTESIS CARTOGRAFICA SUCESIVA (Quinta Etapa)....	32
F. RESULTADOS FINALES (Sexta Etapa).....	32
COMENTARIO FINAL.....	35
LITERATURA CITADA.....	36



PRESENTACION

El presente documento pretende enriquecer la metodología de zonificación agroecológica de cultivos empleada por el equipo técnico de la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial de Desarrollo Agropecuario (SEPSA).

Dentro del marco de cooperación que ha mantenido el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) con esta institución nacional de planificación, la cual tiene a cargo el programa de zonificación agropecuaria en Costa Rica, se realizó una revisión y evaluación del esquema metodológico empleado por SEPSA. En esta revisión se logró detectar algunas técnicas que por el estado actual de conocimientos en materia de zonificación deberían ser actualizadas.

Entre ellas cabe destacar la eliminación del empleo de promedios anuales para analizar las variables climáticas en relación a la producción de cultivos anuales. Estos cultivos permanecen pocos meses en el campo perdiendo todo interés el promedio anual de estas variables.

Las nuevas técnicas de análisis propuestas se basan en la utilización de la información agroclimática anteriormente generada por SEPSA así como la publicada por el autor.

Se seleccionó el sorgo, Sorghum bicolor para ilustración de la metodología presentada. A pesar de que la metodología se desarrolló en este caso en forma manual es del todo posible aplicarla por medio de microcomputadoras con un sistema de Información Geográfica.

En la primera parte del documento se presentará dos métodos teóricos para la definición de la fecha de siembra de los cultivos anuales. El conocimiento de esta fecha es importante para la evaluación posterior de las variables agroecológicas durante el período de cultivo con fines de zonificación, lo que constituye la segunda parte del documento.



I. ANALISIS AGROCLIMATICO PARA DETERMINAR LA FECHA TEORICA
DE SIEMBRA DE LOS CULTIVOS ANUALES EN LOS
PAISES DE LA ZONA INTERTROPICAL

INTRODUCCION

En los países de la zona intertropical, la precipitación pluvial es de los factores del clima el que con mayor frecuencia se vuelve limitante para el desarrollo de los cultivos. Su repartición en el transcurso del año es irregular (alternancia estación seca-estación lluviosa) y su varia bilidad interanual es sumamente grande. Por el contrario, la temperatura y la duración del día varían poco y casi nunca constituyen un impedimento para el desarrollo de los cultivos.

Debido a esto, uno de los principales problemas que se le presenta al agrónomo es el de seleccionar la fecha de siembra más adecuada, que tome en cuenta las posibles restricciones climáticas y las exigencias del cul tivo. En estas condiciones esta fecha debería determinarse utilizando un criterio hídrico.

A continuación se presentan dos métodos de análisis que permiten definir la fecha teórica de siembra desde un punto de vista agroclimático. El primer método resulta más práctico al no requerir mucha información básica. El segundo da mayor precisión al considerar las necesidades hídricas de cada fase fenológica del cultivo.



A. METODO UTILIZANDO LA PRECIPITACION AL 75 POR CIENTO

Este primer análisis para la determinación de la fecha teórica de siembra de los cultivos anuales se basa en el balance hídrico climático o potencial. Se emplean los datos de la evapotranspiración potencial (ETP) calculados por la fórmula de Penman y la precipitación a la probabilidad 75 por ciento (esto es la precipitación que puede suceder 3 años de cada 4). Ambos datos se encuentran en el "Estudio climático para la zonificación agropecuaria y forestal" (Castro, 1985).

El momento de siembra estará determinado cuando la precipitación a la probabilidad 0.75 sobrepase el valor de la mitad de la ETP.

En las Figuras 1 y 2 se ilustra los resultados obtenidos por este método. El período de análisis en este caso es mensual pero se puede realizar por quincena o por década para alcanzar mayor precisión. En estos gráficos se representan los puntos de definición S, B₁ y B₂. S representa el punto teórico de siembra (en el 75 por ciento de los casos) y se calcula a partir de la consideración de que en él, la precipitación es igual a la mitad de la evapotranspiración potencial. B₁ corresponde al punto donde da lugar el comienzo del período húmedo y B₂ representa el fin del período húmedo. Los puntos D₁, comienzo de las lluvias, C₁, término de las mismas no tiene significado representarlos.

Es posible, para ciertos cultivos muy exigentes en agua aumentar el umbral de probabilidad, 80 por ciento (Primer Quintil) por ejemplo (Figura 3).

B. METODO UTILIZANDO EL ANALISIS FRECUENCIAL DE LLUVIAS

Los cultivos anuales tienen necesidades de agua que varían en el curso de su ciclo de desarrollo. Ciertas fases fenológicas son en particular más sensibles que otras a la falta de agua en el suelo; una sequía durante estas fases puede provocar una disminución importante en el rendimiento y a veces la pérdida total de la cosecha.



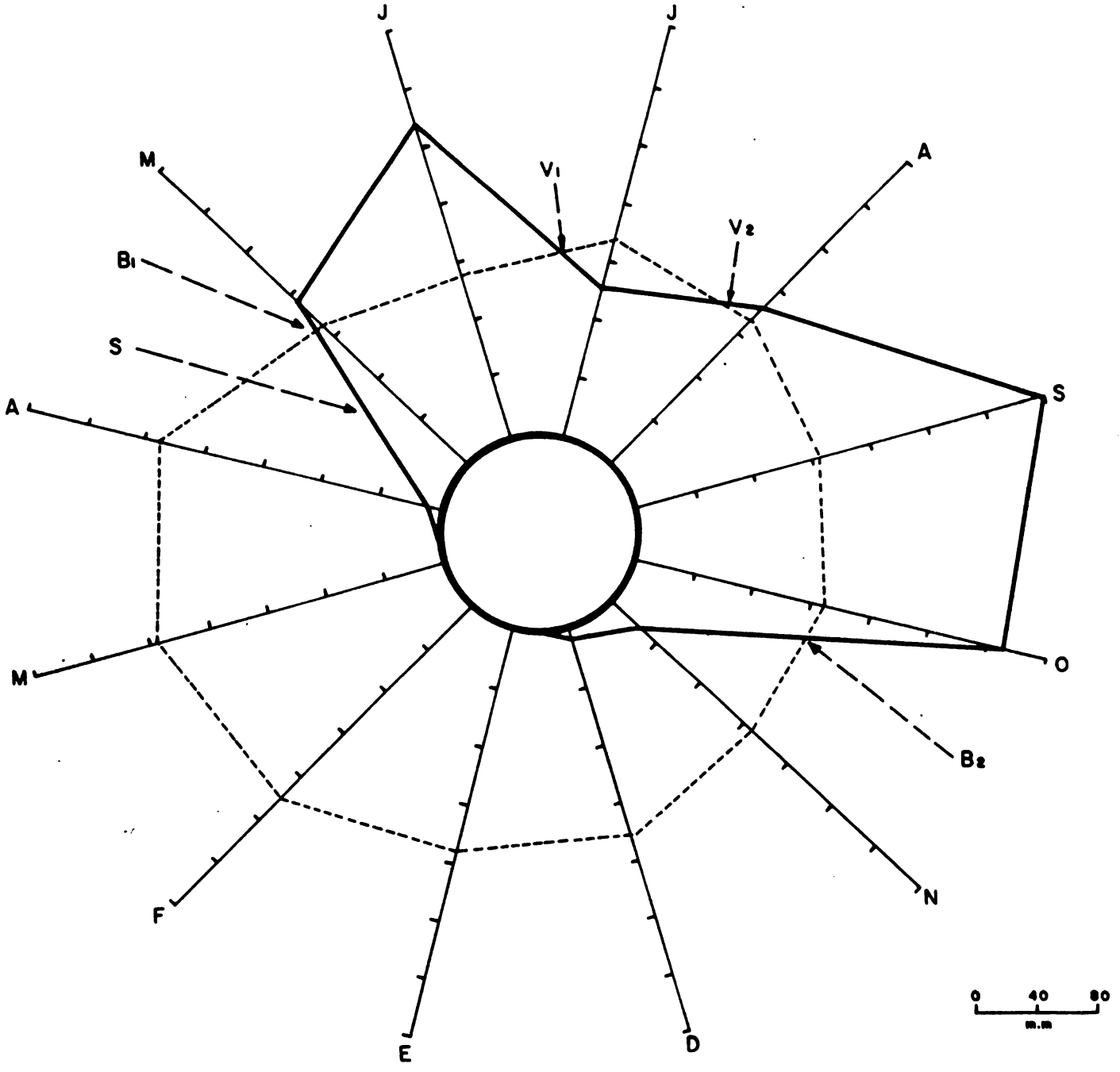


FIGURA 1. Distribución de la precipitación al 75% de probabilidad (—) y la evapotranspiración potencial (----) en Nicoya.

- S: Punto teórico de siembra.
- B₁: Comienzo período húmedo.
- B₂: Fin del período húmedo.
- V₁: Comiezo de la canícula.
- V₂: Fin de la canícula.



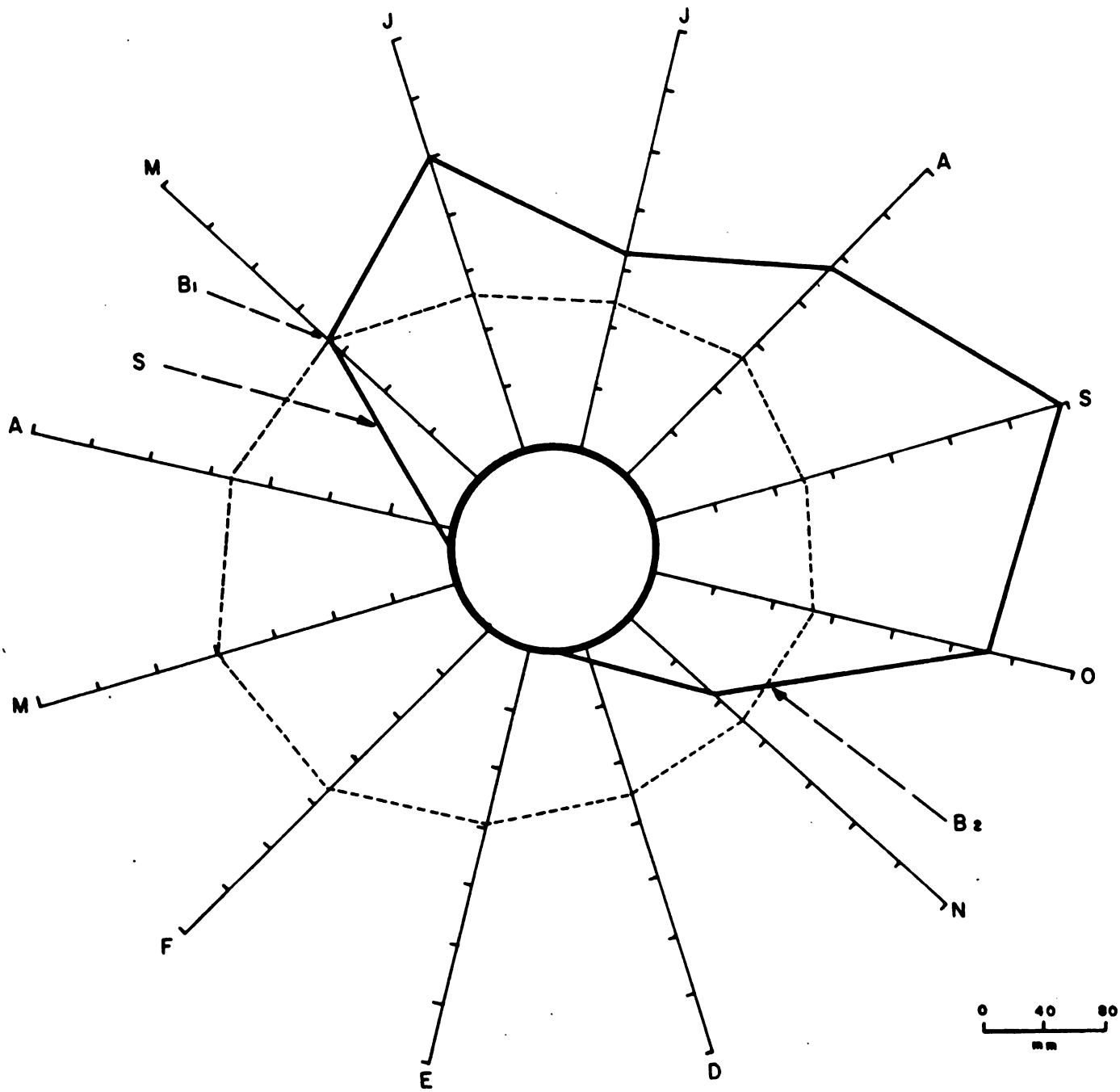


FIGURA 2. Distribución de la precipitación al 75% de probabilidad (—) y la evapotranspiración potencial (----) en San José.

S: Punto teórico de siembra.

B1: Comienzo del período húmedo.

B2: Fin del período húmedo.



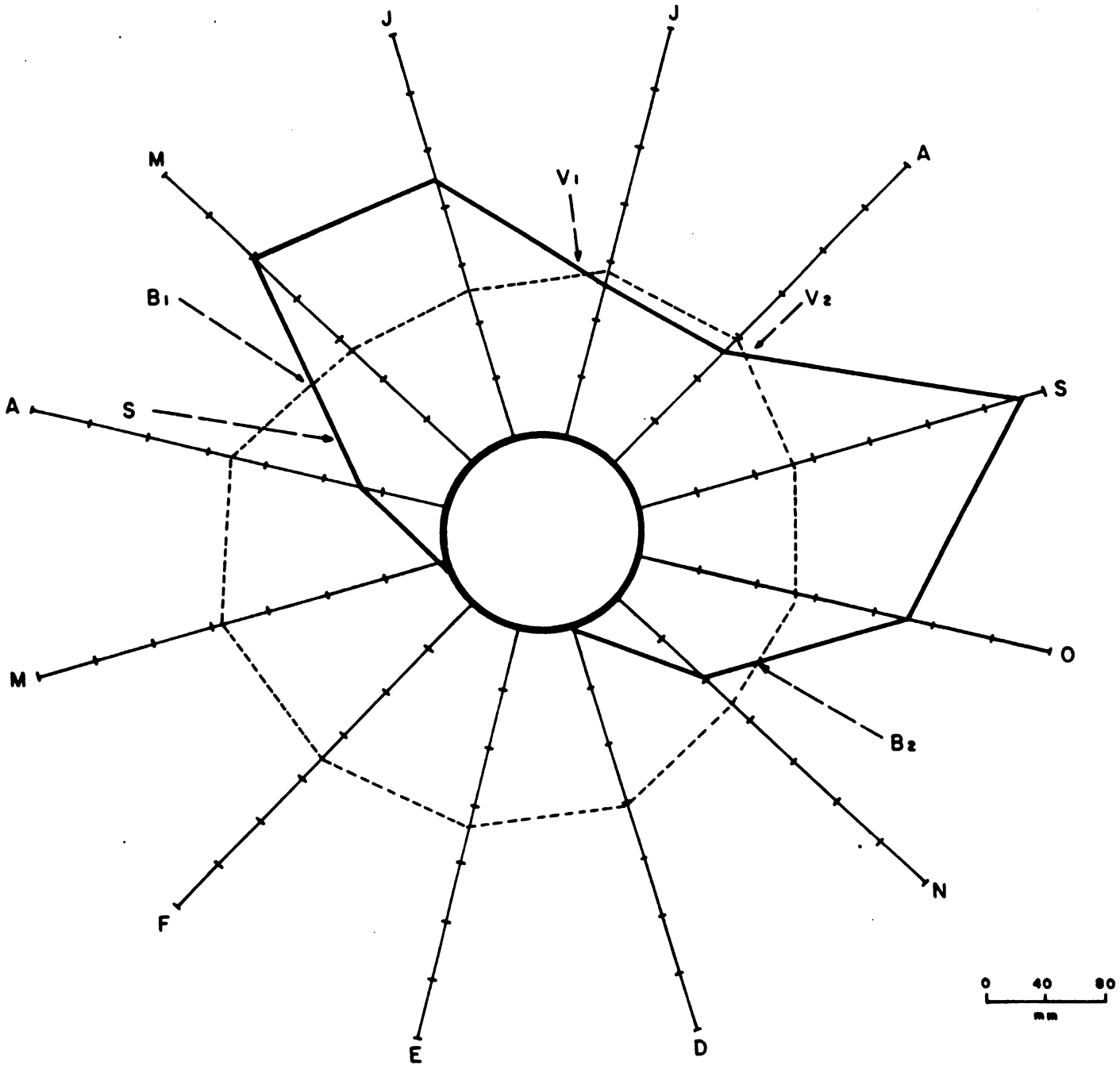


FIGURA 3 Distribución de la precipitación al 80% de probabilidad (—) y la evapotranspiración potencial (----) en Puriscal.

- S: Punto teórico de siembra.
- B₁: Comienzo período húmedo.
- B₂: Fin de período húmedo.
- V₁: Comienzo de la canícula.
- V₂: Fin de la canícula.



El método que se presenta, se basa en el principio de obtener un buen rendimiento el cual está a su vez condicionado por el "éxito" de las fases sensibles, esto es, por la satisfacción prioritaria de las necesidades hídricas propias del cultivo. Se trata por lo tanto de escoger la fecha de siembra para la cual las necesidades coincidan con el máximo de probabilidad de ser satisfechas (Franquin, 1973; Rojas, 1985).

Para cada localidad la oferta climática de agua la constituyen los datos pluviométricos diarios registrados en el curso de los diferentes años. Las necesidades del cultivo deben ser definidas, por un lado, dividiendo el ciclo del cultivo en fases de acuerdo a su requerimiento hídrico, y por otro, cuantificando para cada fase este requerimiento en agua.

Ciertas fases necesitan agua abundante, otras por el contrario, como la maduración en varios cultivos (algodón, maíz) no soportan lluvias importantes.

En términos agroclimáticos, estos ciclos se componen de varios periodos articulados de manera diferente:

- periodos donde el cultivo necesita una disponibilidad de agua inferior a la mitad de la evapotranspiración potencial (ETP). En general la germinación y la maduración.
- periodos donde el cultivo exige una disponibilidad de agua superior a la mitad de la ETP, pero inferior a 0.9 ETP.
- periodos donde el cultivo necesita satisfacer en forma plena sus requerimientos hídricos (más de 0.9 ETP).

El método de análisis consiste en dividir el año en periodos elementales de diez días, denominados décadas. Para cada década se determinan las frecuencias de que la lluvia sobrepase la ETP y la mitad de la ETP. Estas frecuencias se calculan directamente a partir de la muestra de las lluvias diarias, sin ser ajustadas a una función de probabilidad.



La evapotranspiración potencial (ETP), representa aproximadamente el requisito óptimo en agua de un cultivo bien desarrollado y que cubre el suelo. Se puede considerar que la mitad de la evapotranspiración potencial (ETP/2), representa el requisito mínimo para obtener un rendimiento satisfactorio (pero no necesariamente óptimo). Esto constituye evidentemente una aproximación necesaria para simplificar el problema. La ETP se calculó utilizando la fórmula de Priestley y Taylor (5).

Un período elemental de diez días representa una duración estándar, que toma en cuenta la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Por ejemplo, si se considera un suelo con una capacidad máxima de almacenamiento de 50 mm (reserva útil) y una evaporación máxima de 5 mm. día⁻¹, este suelo podrá ceder agua a las plantas durante diez días, sin que exista la necesidad de una nueva lluvia. Sin embargo, esto es un caso extremo, ya que generalmente la reserva útil del suelo es mayor y la evapotranspiración menor a la del ejemplo.

Los resultados, es decir, las frecuencias para cada década, son representados en un gráfico, cuya abscisa representa una escala de tiempo que abarca todo el año y graduada en décadas (36 décadas) y la ordenada una escala de frecuencia graduada de 0 a 1.

Las curvas obtenidas pueden ser utilizadas para determinar la época potencial de cultivo (inicio, duración y fin), a un cierto nivel de probabilidad. Se escoge generalmente el valor de 0,75, que significa una frecuencia de ocurrencia del fenómeno 3 años cada 4 y que corresponde a un riesgo aceptable en agricultura.

Con la ayuda de los resultados del análisis frecuencial de lluvias y conociendo las necesidades hídricas por fase fenológica del cultivo se podrá definir la fecha más adecuada para la siembra.

Se utilizarán los análisis frecuenciales publicados en el "Estudio Agroclimático de Costa Rica " para 72 estaciones meteorológicas del país. (Rojas, 1985).



1. Necesidades hídricas del sorgo (Sorghum bicolor) por fase fenológica.

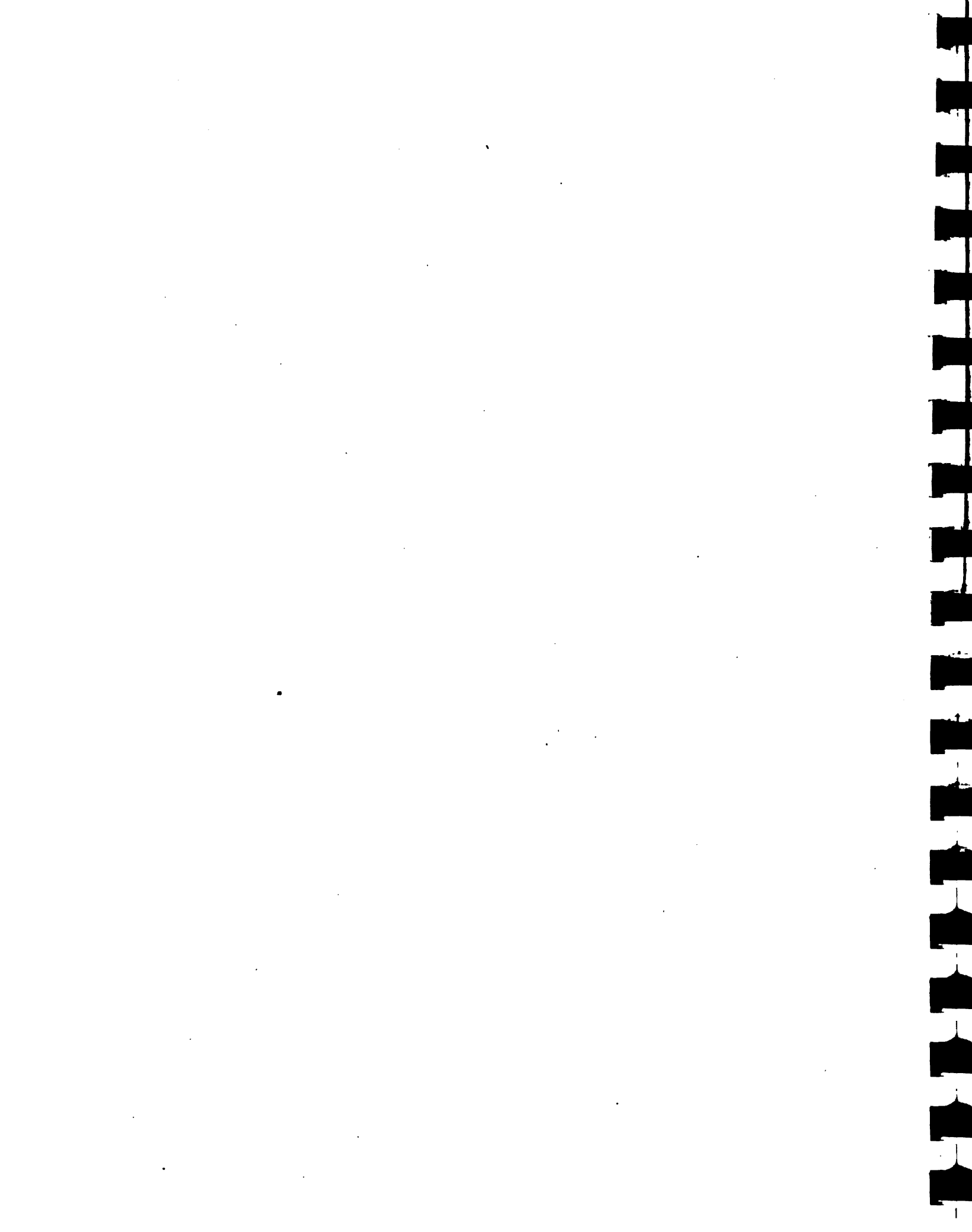
Los sorgos para grano pertenecen a la familia de las gramíneas y se relacionan con la hierba del Sudán (Sorghum vulgare sudanensis) la hierba Johnson y el sorgo empleado en la producción de escobas (Sorghum vulgare).

El sorgo tiene una serie de características que lo clasifican como cultivo resistente a la sequía. Se produce extensamente en seco para la producción de grano y forraje. En zonas secas con lluvias reducidas o irregulares, el cultivo puede reaccionar favorablemente al riego suplementario. Sin embargo, existen considerables diferencias entre las diversas variedades en su respuesta al riego, las que son consideradas como muy resistentes a la sequía responden ligeramente, mientras que las otras producen altos rendimientos con riego pero dan bajo rendimiento cuando el agua es escasa.

Para una producción elevada las necesidades de agua (ETM) de un cultivo de sorgo de 110 a 130 días están entre 450 y 650 mm, dependiendo del clima; a ello hay que añadir las pérdidas durante el transporte y aplicación. El coeficiente de cultivo (Kc) que relaciona la evapotranspiración máxima (ETM) con la evapotranspiración de referencia (ET₀) tiene los valores siguientes: durante la etapa inicial 0,4 (20 a 25 días); en la etapa de desarrollo 0,70-0,75 (30 a 40 días); en la etapa de mediados de estación 1,0-1,15 (40 a 45 días); en la etapa de final de estación 0,75-0,80 (30 días) y en la recolección 0,50-0,55 (Doorenbos, 1979).

En Costa Rica existen dos regiones principales donde se cultiva sorgo: La Región Chorotega y la Brunca. En la Chorotega se cultiva en dos épocas distintas, la época denominada de invernal, cuya fecha de siembra se realiza en el mes de mayo y la veranera del 1º al 22 de setiembre.

En Parrita y Quepos (Región Brunca) la siembra se realiza en el mes de noviembre. En el resto de esta región del 1º al 21 de diciembre.



Las diferentes fases fenológicas del sorgo son

0	establecimiento desde la siembra hasta la iniciación de la espiga	15-20 días
1	período vegetativo, desde la iniciación de la espiga hasta la salida de ésta.	20-30 días
2	floración, desde la salida de la espiga hasta el establecimiento de la semilla.	15-20 días
3	formación de la cosecha, desde el establecimiento de la semilla hasta la madurez fisiológica	35-40 días
4	maduración, desde la madurez fisiológica hasta la recolección.	10-15 días
	Ciclo Total	95-125 días

Estas fases se representan en la Figura 4 con los diferentes coeficientes de cultivo para cada etapa fenológica del sorgo.

En un interesante estudio realizado por Doorenbos (1979) se calcula la relación existente entre la disminución del rendimiento relativo $(1 - Y_a / Y_m)$ y el déficit de evapotranspiración relativa $(1 - ETR/ETM)$ para el sorgo.

El rendimiento máximo de un cultivo (Y_m) se define como el rendimiento cosechado de una variedad de gran producción, bien adaptada al ambiente vegetativo de que se trate, incluyendo el tiempo disponible para llegar a la madurez, en condiciones tales que su rendimiento no esté limitado por agua, nutrientes, plagas o enfermedades. Los factores climáticos que determinan Y_m son la temperatura, radiación y la duración de la estación vegetativa total; además de las necesidades específicas del cultivo, en cuanto a temperatura y duración del día para su desarrollo.

Cuando el suministro de agua no cubre las necesidades del cultivo, la evapotranspiración real (ETR o ETa) es inferior a la





evapotranspiración máxima (ETM) o sea $E_t < ET_m$.

En estas condiciones, se desarrolla un déficit hídrico en la planta que afecta adversamente el crecimiento del cultivo, y finalmente su rendimiento. El efecto de esta carencia de agua sobre el crecimiento y el rendimiento depende, por una parte, de la especie y variedad de cultivo, por otra de la magnitud y del tiempo en que tenga lugar el déficit de agua.

Doorenbos (1979) calculó el efecto de la disminución de la evapotranspiración sobre el rendimiento del sorgo para el período vegetativo total y para los distintos períodos de desarrollo.

(Figura 5).

El sorgo es relativamente más resistente a la sequía que muchos otros cultivos, que el maíz por ejemplo. Esto se debe a su extenso sistema radical, al control efectivo de la evapotranspiración y a sus estomas con capacidad de recuperación rápida después de períodos secos. Además cuando la estación vegetativa es larga, las variedades con renuevos son capaces de recuperarse, en cierta medida, del déficit de agua en períodos anteriores, mediante la formación de renuevos adicionales portadores de espigas.

Déficits hídricos severos durante el período de floración motivan el fracaso de la polinización o el secado de la espiga.

En relación a la formación de materia seca y absorción de nutrientes en la Figura 6 se puede notar, si se toma la línea vertical que designa la floración a 60 días después de emerger, que casi la mitad del peso de la planta ya se ha producido. Además alrededor del 60 por ciento de fósforo, el 70 por ciento de nitrógeno y el 80 por ciento del potasio ya han sido fijados. Estos porcentajes indican la importancia que tienen las primeras etapas de crecimiento en la planta de sorgo.

Durante los primeros 30-35 días después de la emergencia de la planta, casi todo el crecimiento son hojas. Después el tallo comienza a crecer rápidamente y continúan tallos y hojas hasta que



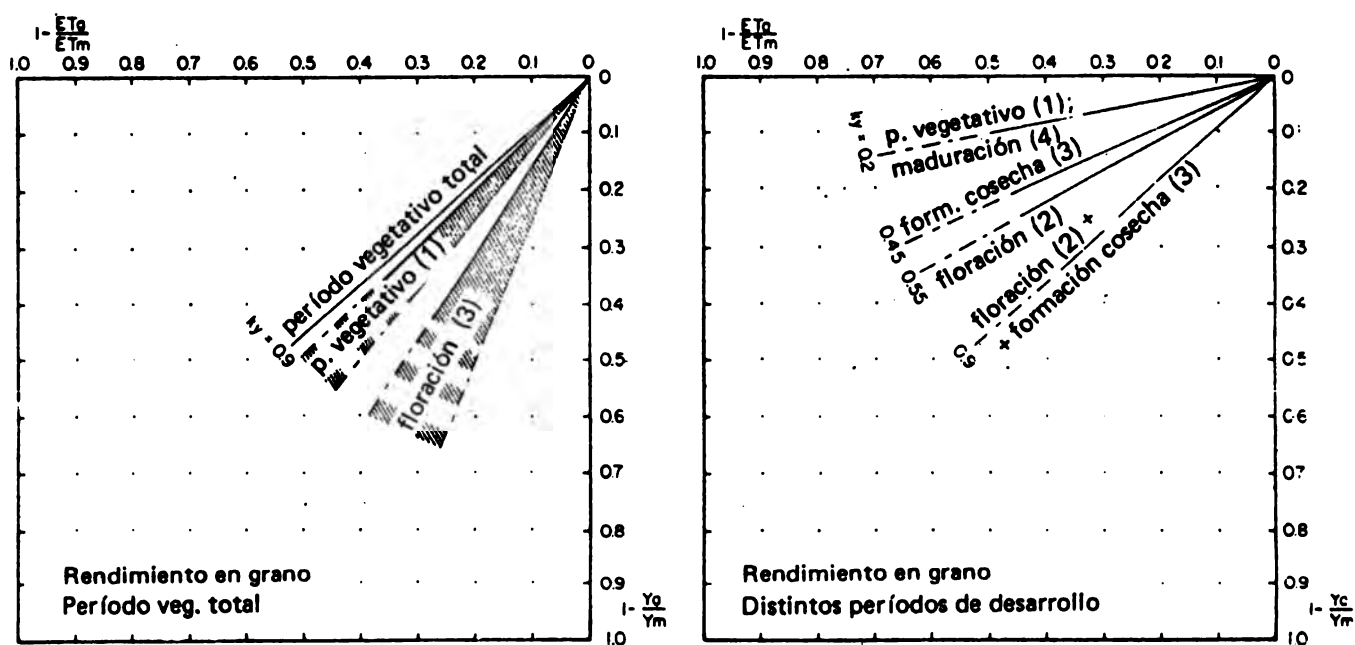


Figura 5. Relación entre la disminución del rendimiento relativo ($1 - Y_a/Y_m$) y el déficit de evapotranspiración relativa ($1 - ET_a/ET_m$) para el sorgo.



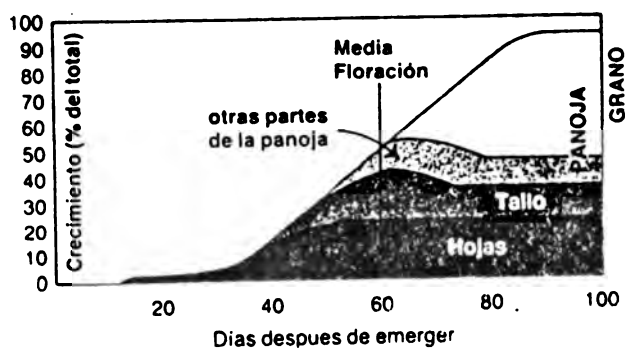


Figura 6. Formación de la materia seca en el sorgo



el peso máximo de las hojas es alcanzado a los 60 días, y el peso del tallo a los 65 días. Después de los 50 días la panoja empieza a aumentar de peso rápidamente, a veces aún más rápido que la proporción en que se va acumulando la materia seca. Lo anterior resulta en una pérdida de peso en el tallo ya que los materiales de esta se mueven hacia la panoja.

2. Aplicación Práctica

Para ilustrar este método se consideró la estación de Santa Cruz ubicada en la región Chorotega de Costa Rica (10°16' Latitud Norte, 85°35' Longitud Oeste y 54 msnm). Estación que cuenta con 30 años de registros pluviométricos.

El clima en esta región se caracteriza por presentar dos estaciones bien definidas: estación seca y lluviosa. La estación lluviosa presenta la característica de tener dos máximos, separados por una disminución de la intensidad de la lluvia, en los meses de julio y agosto, debido a una conjugación de factores meteorológicos denominada "canícula" o "veranillo".

Las necesidades hídricas del sorgo estudiadas en los párrafos anteriores se resumen en forma de esquemas en la Figura 7. Los esquemas están, evidentemente, a la misma escala que las curvas del análisis frecuencial de lluvias, lo que fácilmente permite superponerlas con la ayuda de una regla graduada. Se intenta, en esta parte, confrontar las diferentes necesidades hídricas de cada etapa fenológica del sorgo con el aporte natural de agua. Los períodos más sensibles a la sequía deberán coincidir con las frecuencias más altas de que la lluvia supere el valor de ETP.

Debido a la distribución de la precipitación en Santa Cruz no es posible para la siembra denominada invernal cultivar un sorgo mayor de 95 días. Siendo esta duración la más adecuada como se aprecia en la Figura 8.



CICLOS VEGETATIVOS DEL SORGO



SORGO CICLO CORTO (95 DIAS)



SORGO TARDIO (120 DIAS)

LEYENDA :



Porción del ciclo vegetativo que debe coincidir con un período húmedo donde:



Período de mayor sensibilidad a la sequía (floración, en general)



Porción del ciclo vegetativo que puede soportar períodos semi-húmedos (germinación, crecimiento.)



Porción del ciclo vegetativo que puede soportar períodos semi-húmedos o secos (maduración)

FIGURA 7. Duración del ciclo vegetativo y sensibilidad de cada fase fenológica a la sequía del sorgo.



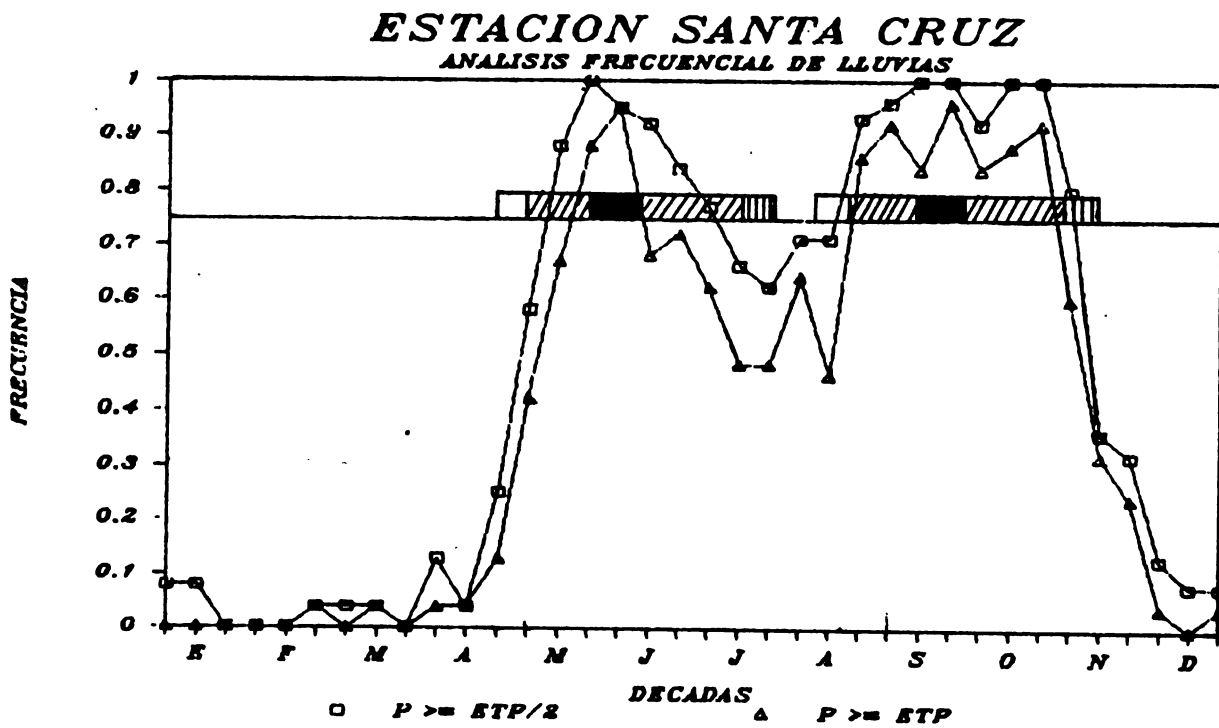


Figura 8. Fechas óptimas de siembra para dos cosechas de sorgo de 95 días, invernal (alrededor del 20 de abril) y veranera (alrededor del 15 de agosto).



182

El período más sensible a la sequía, la floración del sorgo, coincide con un aumento de la frecuencia de que la precipitación supere la ETP. Para las décadas subsiguientes esta frecuencia disminuye en forma favorable para la maduración de este cultivo, ya que se necesita cosechar el grano con un porcentaje bajo de humedad. (15-17% humedad del grano). Por estas razones la fecha más apropiada para la siembra se ubica alrededor del 20 de abril.

Para una segunda siembra denominada veranera aprovechando el período de mayor precipitación en la región se podría cultivar tanto un sorgo de ciclo corto (95 días) como uno de mayor duración. En el caso de cultivar un sorgo de 95 días la fecha de siembra se ubicará alrededor del 15 de agosto, sin embargo se aprecia, a diferencia de lo que sucede en la primera siembra, la disminución de las precipitaciones no se da en forma paulatina al final del ciclo. Esto puede provocar problemas por exceso de humedad disminuyendo la calidad del grano. En este caso sería recomendable sembrar una variedad de mayor duración para que la cosecha coincida con meses más secos.



II. ZONIFICACION AGROECOLOGICA DEL SORGO

Para la determinación del potencial productivo de las diferentes regiones del país en relación a los cultivos anuales se puede emplear la metodología propuesta por Rojas (1986) en "Estudio Agroclimático y Zonificación Agroecológica de Cultivos Metodología y Resultados", o emplear el esquema metodológico de zonificación del equipo de trabajo de SEPSA (Protti, 1985).

En este último caso se deberá modificar el análisis anual de las variables climáticas por un estudio de estas variables sólo durante el ciclo del cultivo.

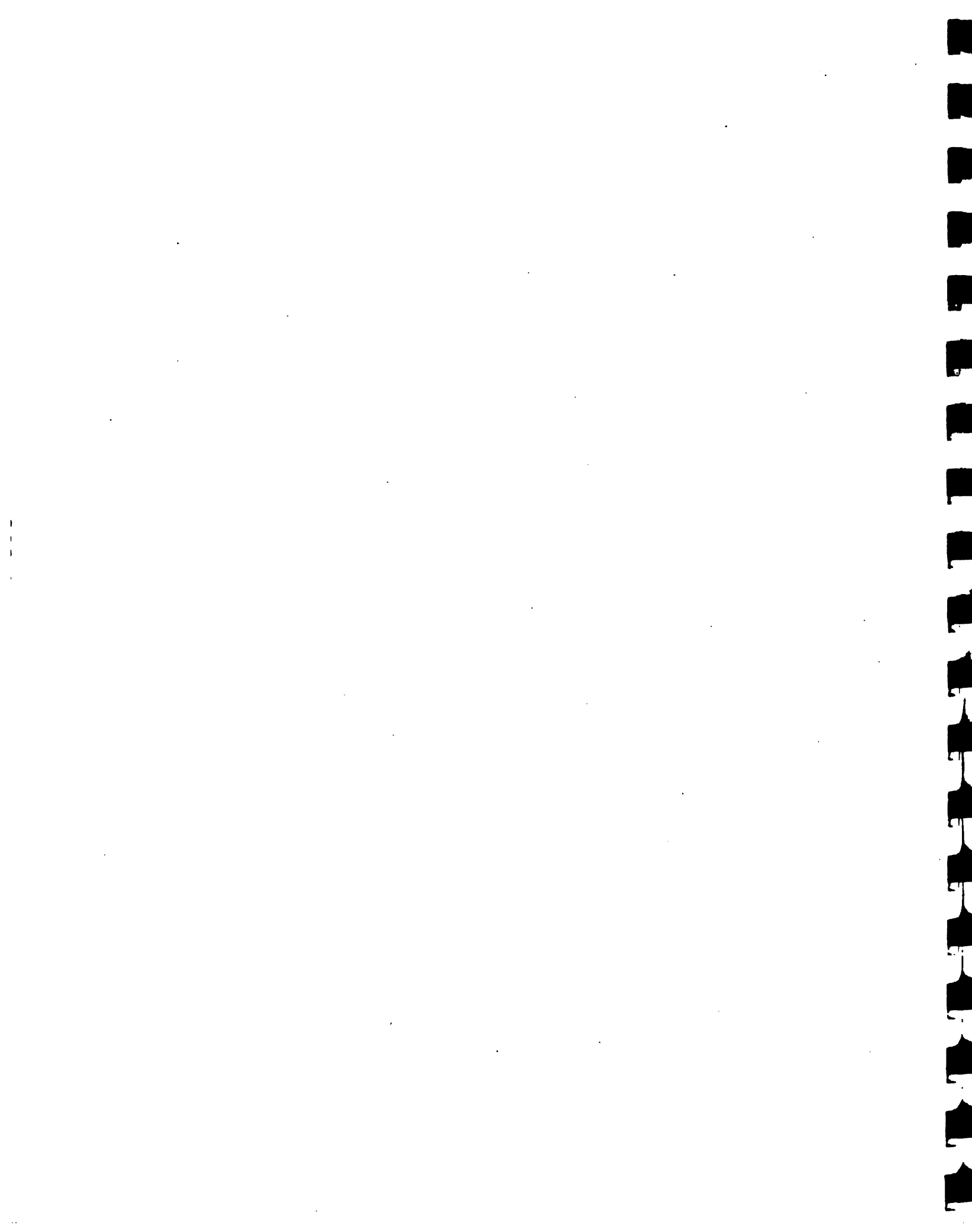
El inicio de este ciclo será determinado por la fecha de siembra que garantice la mayor probabilidad de "éxito", como se presentó en la primera parte de este documento.

En forma resumida las etapas que comprenden este esquema son:

- A. Primera Etapa: Definición de los requerimientos agroecológicos del cultivo.
 - B. Segunda Etapa: Definición de la fecha de siembra más adecuada para el cultivo.
 - C. Tercera Etapa: Definición de las potencialidades agroclimáticas de producción para el cultivo.
 - D. Cuarta Etapa: Análisis de las variables fisioedáficas en relación al cultivo.
 - E. Quinta Etapa: Síntesis cartográfica sucesiva
 - F. Sexta Etapa: Presentación de los resultados finales
- Resultados y Discusión

A. DEFINICION DE LOS REQUERIMIENTOS AGROECOLOGICOS DEL CULTIVO (Primera Etapa)

Las temperaturas óptimas para las variedades de gran producción deben ser superiores a los 25°C, sin embargo, existen algunas variedades



que se adaptan a temperaturas inferiores produciendo rendimientos aceptables. (Doorenbos, 1979).

Cuando la temperatura media diurna durante la estación vegetativa es superior a los 20°C, las variedades tempranas de sorgo para grano tardan en madurar de 90 a 110 días, y las variedades intermedias de 110 a 140 días. Cuando la temperatura media diurna es inferior a 20°C, se alarga el período vegetativo en unos 10 a 20 días por cada 0,5°C de disminución de la temperatura (dependiendo de la variedad) y a 15°C un cultivo de sorgo tardaría en madurar de 250 a 300 días. Con temperaturas del orden de 10 a 15°C sólo se puede cultivar sorgo para forraje, debido a que se presentan problemas para el establecimiento de la semilla y madurez del grano.

Temperaturas bajas (menores de 15°C) durante la floración y formación de la cosecha y temperaturas altas (mayores de 35°C) ocasionan malformación de la semilla, problemas de maduración y rendimientos reducidos. La semilla del sorgo germina con temperaturas en el suelo de 11° y 12°C. El aumento de la temperatura hasta 21°C incrementa la germinación en un 50 por ciento.

El sorgo muestra una resistencia relativa mayor que muchos cultivos esto se debe a los siguientes factores:

1. Posee un sistema radicular bastante profundo, muy ramificado y denso que le permite explorar un gran volumen de suelo.
2. El crecimiento de la parte aérea se desfasa en relación con la subterránea. Por ello, las hojas no se marchitan aunque la humedad escasee, ya que el reducido número de las que brotan en el primer mes hace que las abundantes raíces provean adecuadamente sus necesidades transpiratorias.
3. En pleno desarrollo, la superficie foliar de transpiración del sorgo es aproximadamente un 55 por ciento de la del maíz, mientras que el sistema radicular no presenta grandes diferencias. De esto se deduce su mejor adaptación a condiciones de mayor aridez.



188

4. Las hojas están cubiertas por una capa protectora que entra en acción cuando la sequía se acentúa, reduciendo considerablemente las pérdidas por transpiración.
5. El sorgo tiene la facultad de reducir su actividad vegetativa cuando el binomio temperatura-humedad sea especialmente adverso por elevación de la primera y disminución de la última. La planta pasa entonces por un estado latente, pero rehace su actividad cuando el porcentaje de humedad se eleva.
6. El sorgo presenta, mucho más acentuado que el resto de los cereales cultivados, la facultad de que sus hojas se enrollen longitudinalmente, creando una cámara protectora. En efecto, el aire en ella contenido conserva un porcentaje de humedad superior al de la atmósfera debido a lo cual la transpiración se reduce en forma considerable (Infante; Hernández, 1984).

B. DEFINICION DE LA FECHA DE SIEMBRA MAS ADECUADA PARA EL CULTIVO
(Segunda Etapa)

En la primera parte de este documento se presentó la metodología empleada para la definición de la fecha más adecuada para la siembra de los cultivos anuales, en este caso del sorgo. De la Figura 9 a la 14 se presenta los resultados para otras estaciones de la región Chorotega. Sobresale el efecto de la canícula en la estación de Liberia; disminución de la precipitación que causaría grandes daños si se tratara de otro cultivo. Las características del sorgo para adaptarse a condiciones de agua limitada hacen posible su cultivo en esta región.

Sería recomendable realizar un estudio más detallado sobre el efecto de esta disminución de precipitaciones sobre el rendimiento final del sorgo para poder tener mejores elementos de juicio al evaluar la potencialidad de la región. También es necesaria mayor información en relación a los excesos de humedad sobre la calidad del grano. A la fecha estos aspectos no han sido abordados con la profundidad que



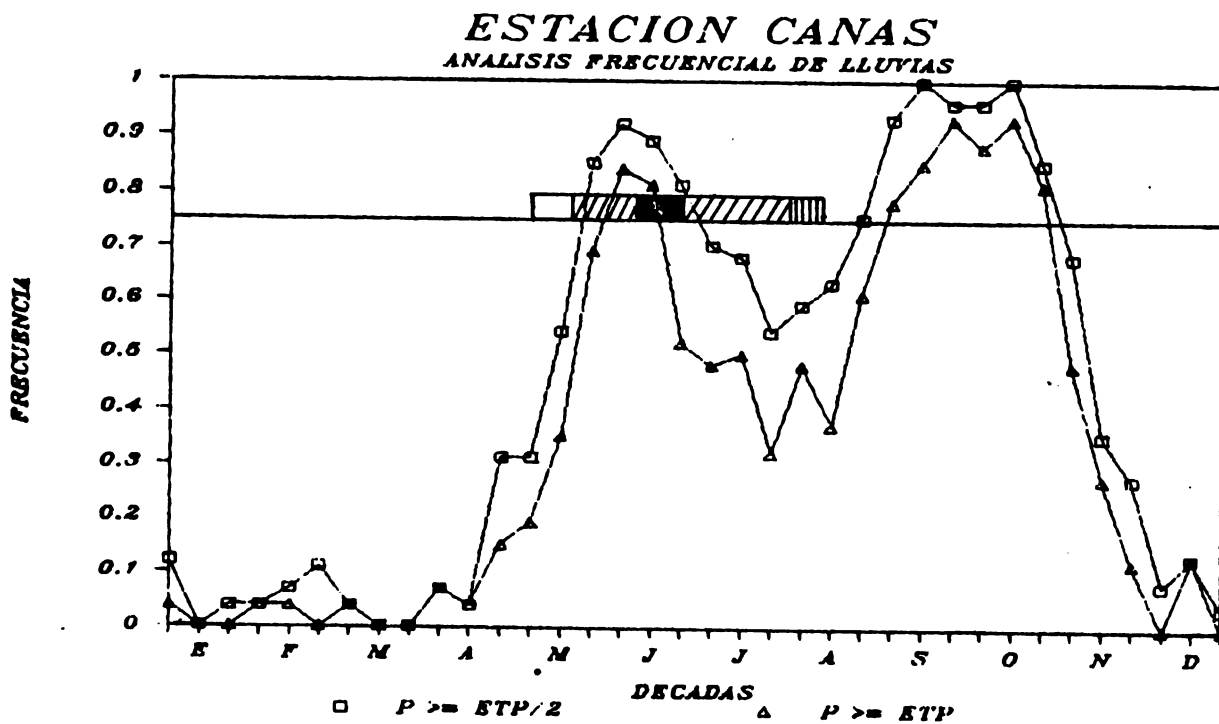


Figura 9. Fecha óptima de siembra en el caso de una variedad de sorgo de 95 días (alrededor del 10 de mayo).



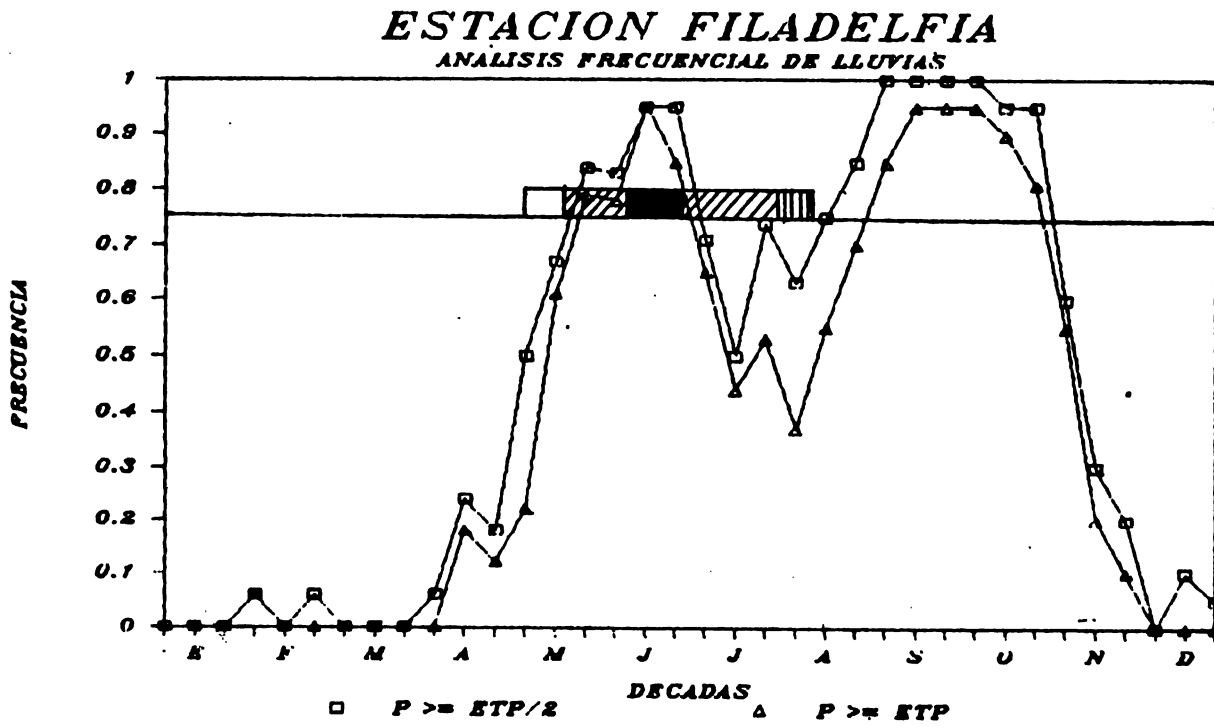
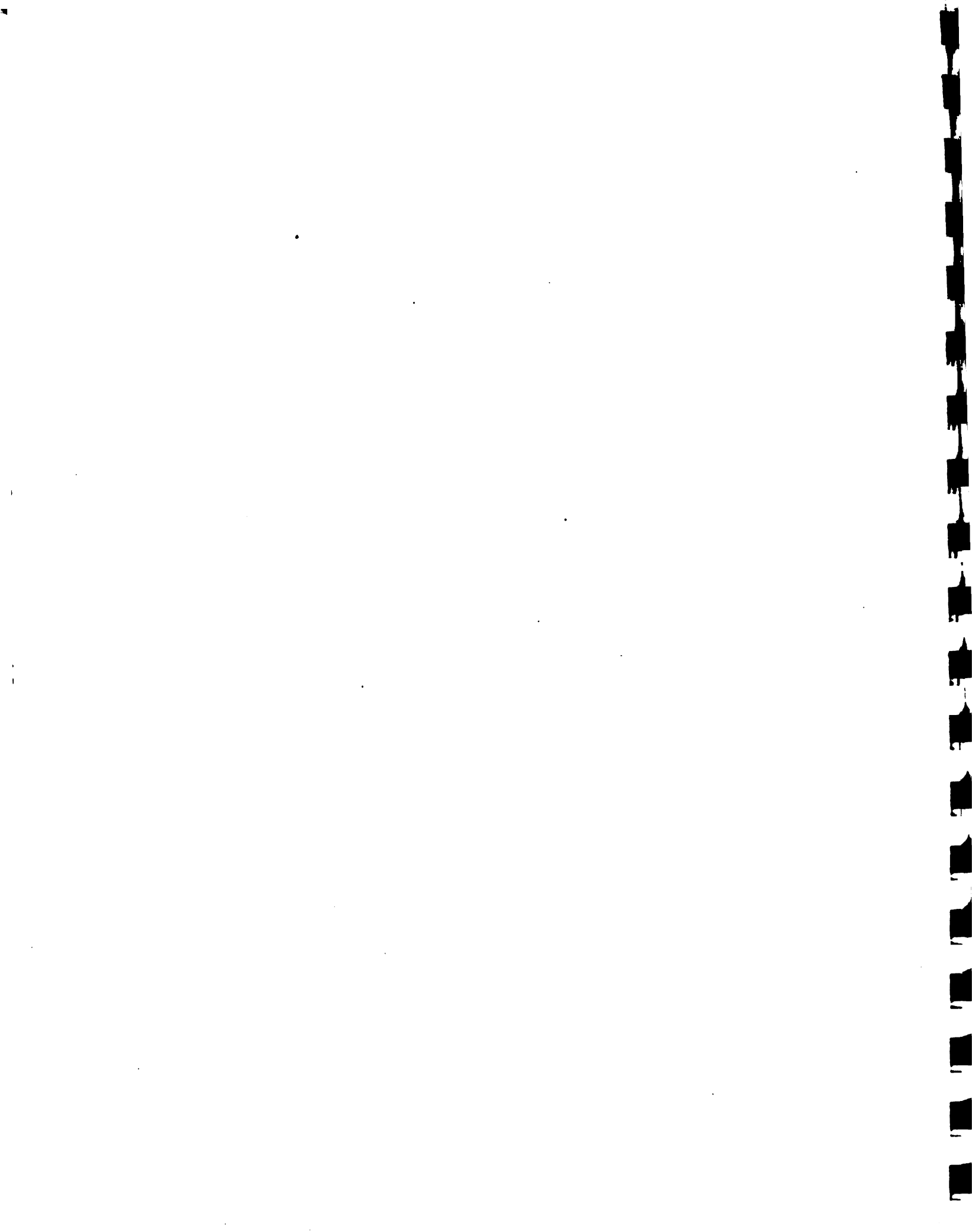


Figura 10. Fecha óptima de siembra para el caso de una variedad de sorgo de 95 días (alrededor del 10 de mayo).







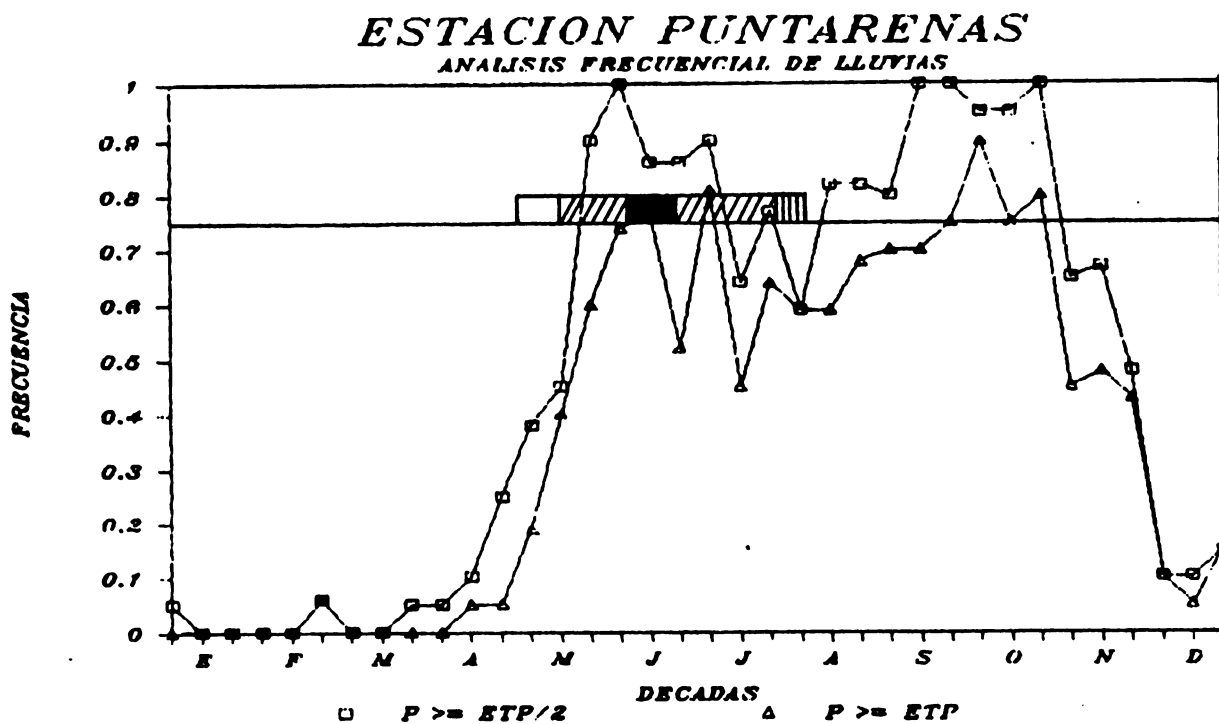


Figura 13. Fecha óptima de siembra en el caso de una variedad de sorgo de 95 días (alrededor del 1º de mayo).



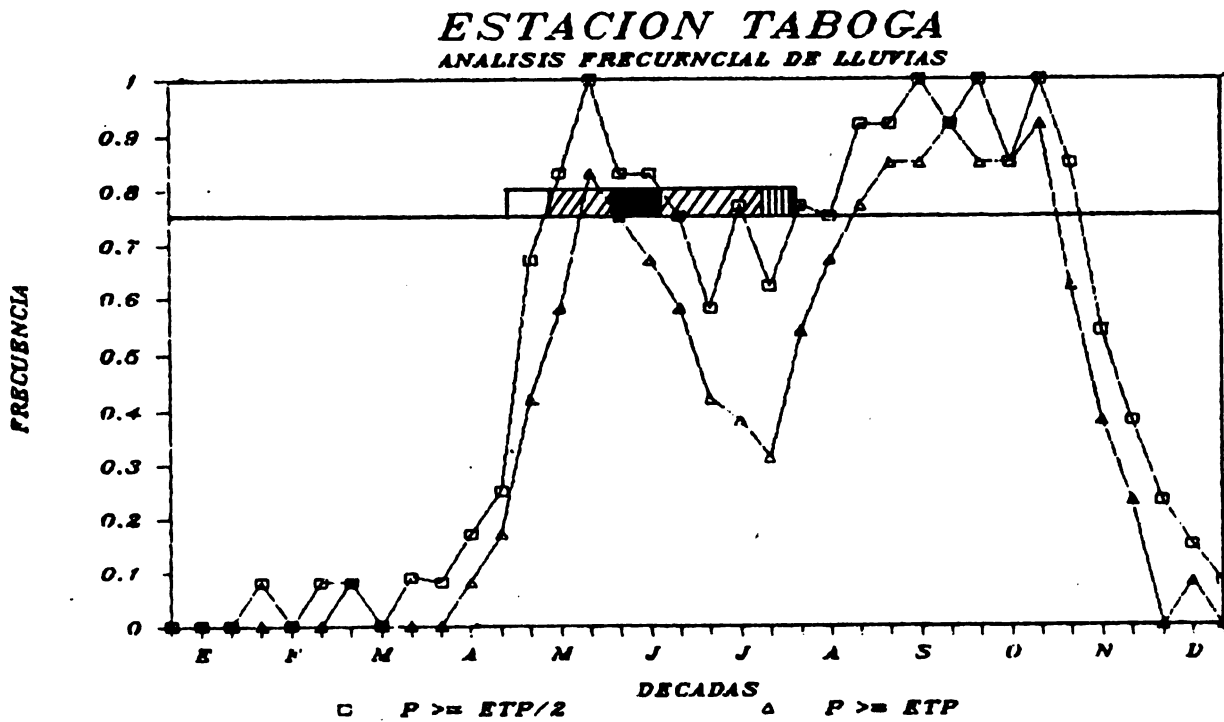


Figura 14. Fecha óptima de siembra en el caso de una variedad de sorgo de 95 días (alrededor del 30 de abril).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

merecen al ser considerado el sorgo como un cultivo de relativa importancia.

En términos generales la fecha de siembra se ubica alrededor del 10 de mayo. Sin embargo, la distribución de la precipitación varía de acuerdo a la ubicación dentro de la región.

C. DEFINICION DE LAS POTENCIALIDADES AGROCLIMATICAS DE PRODUCCION PARA EL CULTIVO (Tercera etapa)

En esta etapa una vez definida la fecha de siembra del cultivo y la duración de su ciclo se analizan las otras variables del clima relacionadas con la producción. Esto se puede realizar usando la metodología tradicional empleada por SEPSA con la modificación señalada anteriormente o empleando una función de producción de biomasa. En el primer caso se utilizarán los resultados del Estudio Climático de Costa Rica para la zonificación agropecuaria y forestal (Castro, 1985) para el estudio de las condiciones agroclimáticas en los meses en que el cultivo se encuentra en el campo. Para el segundo caso se presenta el cálculo para la estación Santa Cruz del índice de producción potencial. (Para los detalles de la metodología referirse a F.A.O., 1981; Rojas, 1986).

Ejemplo:

1. Información sobre el clima

Situación: 10°16' Latitud Norte 85°35' Longitud Oeste

Altitud: 54 msnm

Perfodo de crecimiento: 80 días

Comienzo perfodo de crecimiento: década 13

Fin del perfodo de crecimiento: década 20

Promedio de radiación durante el perfodo de crecimiento: $377 \text{ cal.cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$

Temperatura diurna media durante el perfodo de crecimiento 29.7°C.



Promedio de la temperatura media de las 24 horas durante el período de crecimiento: 25,3°C.

2. Información sobre el cultivo

Planta: Sorgo

Días para la madurez 95 días

Índice foliar en el punto de inflexión de la curva de crecimiento o en el momento de máxima velocidad de crecimiento: 5

Índice de cosecha: 0,25

Grupo de adaptabilidad: III (C₄)

3. Cálculo de la velocidad de producción de biomasa bruta (bgm)

Velocidad de fotosíntesis (Pm) a 29,7°C: 38,5 kg⁻¹ · h⁻¹
(Figura 15).

Promedio de radiación fotosintéticamente activa en días despejados (Ac) durante el período de crecimiento: 375.5 cal. cm⁻² · día⁻¹
(Cuadro 1).

Fracción del día en que el cielo está cubierto (F):

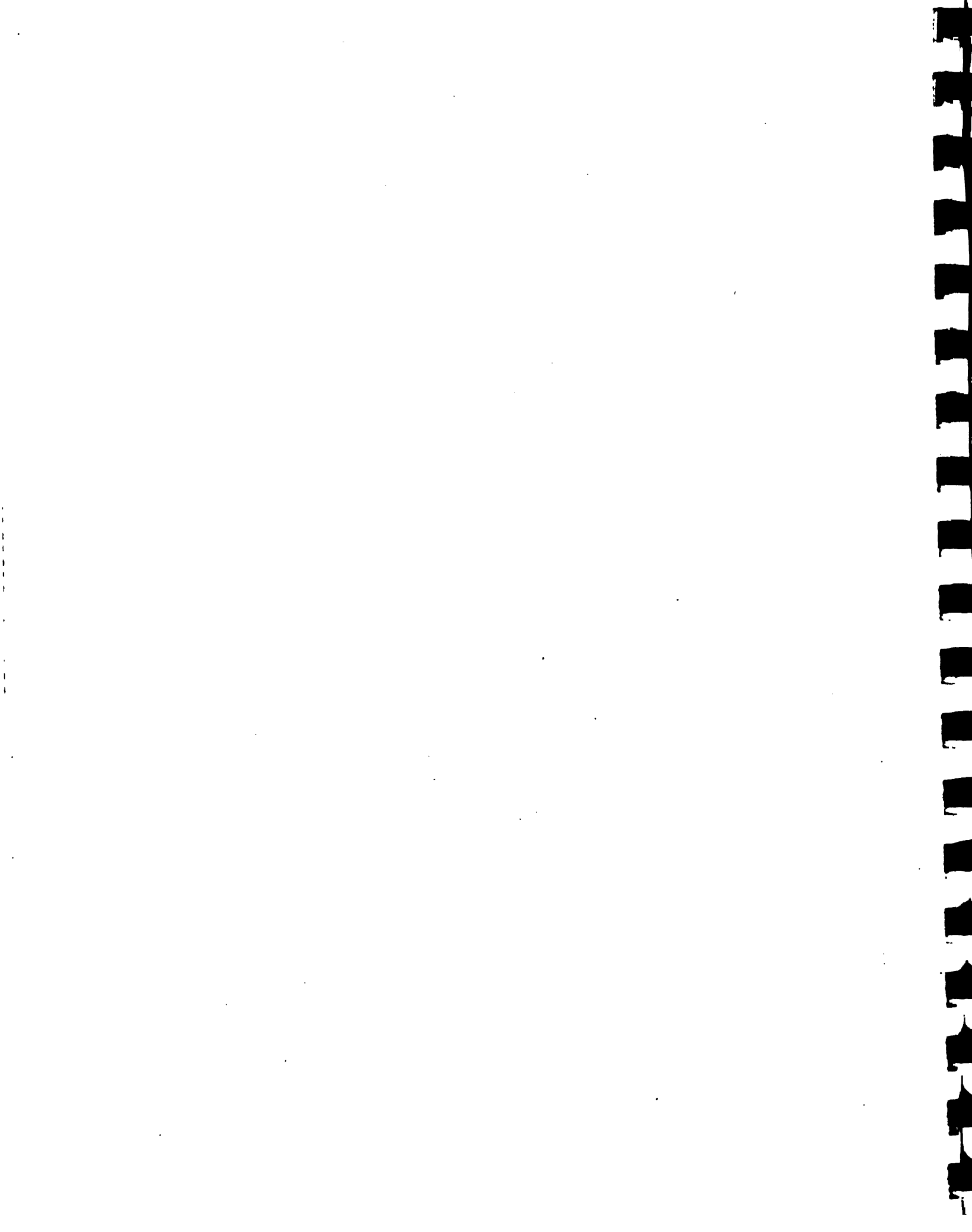
$$F = (Ac - 0.5 R_g) / 0.8 Ac$$

$$F = (375.5 - 0.5 \cdot 377) / 0.8 (375.5)$$

$$F = 0.62$$

Velocidad media de producción de biomasa bruta en días perfectamente despejados con Pm = 20 kg · ha⁻¹ · h⁻¹ (b_c) durante el período de crecimiento: 440 kg · ha⁻¹ · día⁻¹ (Cuadro 1).

Velocidad media de producción de biomasa bruta en días totalmente cubiertos con Pm = 20 kg · ha⁻¹ · h⁻¹ (b_o) durante el período de crecimiento: 236 kg · ha⁻¹ e índice foliar 5 (bgm).



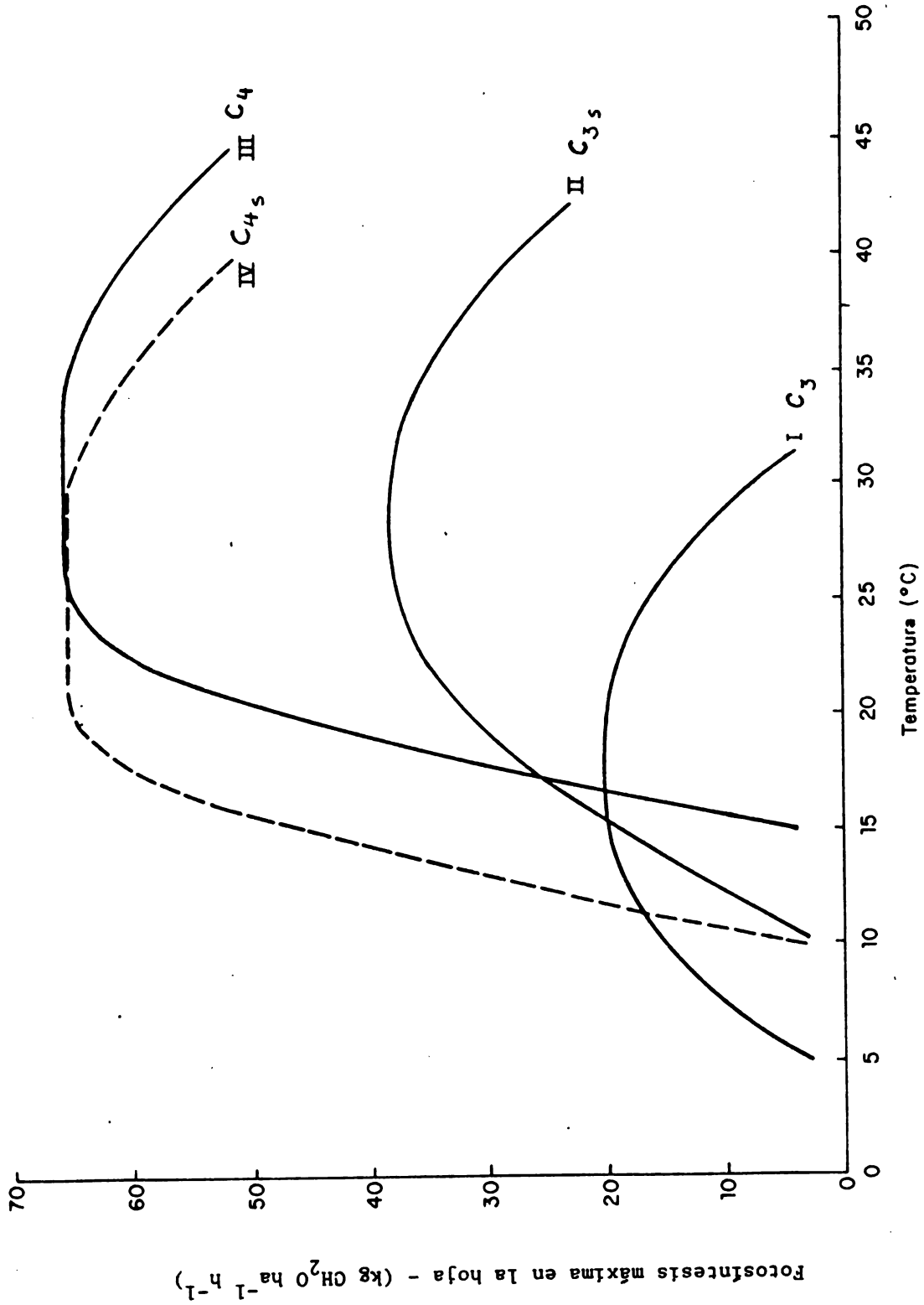


Fig. 15. Relación media entre la velocidad máxima de fotosíntesis en la hoja (P_m) y la temperatura, en los grupos de cultivos I, II, III y IV



208

Cuadro 1 RADIACION FOTOSINTETICAMENTE ACTIVA EN DIAS TOTALMENTE DESPEJADOS (Ac), EN CAL CM-2 DIA⁻¹ Y VELOCIDAD DE FOTOSINTESIS BRUTA (DIARIA) DEL FOLLAJE EN DIAS TOTALMENTE DESPEJADOS (bc) Y CUBIERTOS (bo, EN KC. HA⁻¹ DIA⁻¹, CON P_m = 20 KG CH₂O HA⁻¹ H⁻¹ (TOMADO DE DE WIT)

Latitud Norte	15 Ene.		15 Feb.		15 Mar.		15 Abr.		15 May.		15 Jun.		15 Jul.		15 Ago.		15 Sep.		15 Oct.		15 Nov.		15 Dic.		
	0°	A _c	343	360	369	364	349	337	342	357	368	365	349	337	342	357	368	365	349	337	342	357	368	365	349
	b _c	413	424	429	426	417	410	413	422	429	427	418	410	413	422	429	427	418	410	413	422	429	427	418	410
	b _o	219	226	230	228	221	216	218	225	230	228	222	216	218	225	230	228	222	216	218	225	230	228	222	216
10°	A _c	299	332	359	375	377	374	375	377	369	345	311	291	375	377	369	345	311	291	375	377	369	345	311	291
	b _c	376	401	422	437	440	440	440	439	431	411	385	370	440	439	431	411	385	370	440	439	431	411	385	370
	b _o	197	212	225	234	236	235	236	235	230	218	203	193	236	235	230	218	203	193	236	235	230	218	203	193
20°	A _c	249	293	337	375	394	400	399	386	357	313	264	238	399	386	357	313	264	238	399	386	357	313	264	238
	b _c	334	371	407	439	460	468	465	451	425	387	348	325	465	451	425	387	348	325	465	451	425	387	348	325
	b _o	170	193	215	235	246	250	249	242	226	203	178	164	249	242	226	203	178	164	249	242	226	203	178	164
30°	A _c	191	245	303	363	400	417	411	384	333	270	210	179	411	384	333	270	210	179	411	384	333	270	210	179
	b _c	281	333	385	437	471	489	483	456	412	356	299	269	483	456	412	356	299	269	483	456	412	356	299	269
	b _o	137	168	200	232	251	261	258	243	216	182	130	130	258	243	216	182	148	130	258	243	216	182	148	130
40°	A _c	131	190	260	339	396	422	413	369	298	220	151	118	413	369	298	220	151	118	413	369	298	220	151	118
	b _c	218	283	353	427	480	506	497	455	390	314	204	204	497	455	390	314	241	204	497	455	390	314	241	204
	b _o	99	137	178	223	253	268	263	239	200	155	91	91	268	239	200	155	112	91	268	239	200	155	112	91



$$bgm = F \cdot b_o (0.8 + 0.01 P_m) + (1-F) b_c (0.5 + 0.025 P_m)$$

$$bgm = 417.9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ dfa}^{-1}$$

d- Cálculo de la producción total de biomasa neta (B_n) y de biomasa económicamente aprovechable (B_y)

Coefficiente de respiración de mantenimiento a 30°C:

0,0108 (plantas no leguminosas)

Coefficiente de respiración de mantenimiento a 27.9°C (c_t)

$$c_t = 0.0108 (0.044 + 0.0019 t + 0.001 t^2)$$

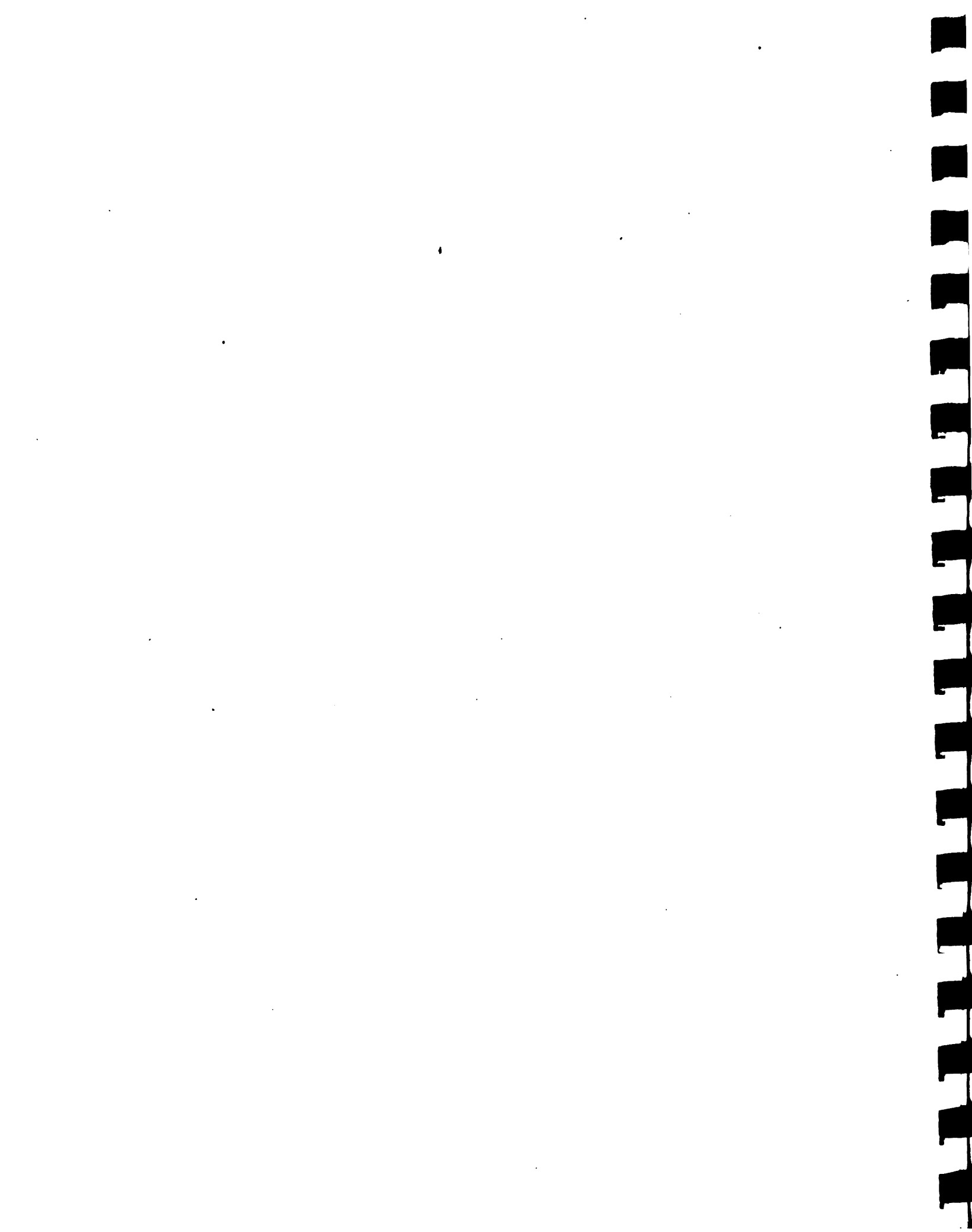
$$c_t = 0.00949$$

$$B_n = (0.36 \text{ bgm}) / 1/N + 0.25 c_t$$

$$B_n = 10.116 \text{ toneladas de sorgo por hectárea}$$

$$B_y = 2.52 \text{ toneladas de grano de sorgo por hectárea}$$

El objetivo de la metodología apenas descrita es cuantificar el rendimiento de un cultivo durante el período de crecimiento, en ausencia de impedimentos, a partir de las respuestas generalizadas de diferentes grupos de cultivos a los factores climáticos medios de radiación (radiación diaria media) y de temperatura (diurna media) y de la respuesta también generalizada de la respiración a la temperatura (media sobre las 24 horas). Los valores previstos, pueden diferir, en la medida en que las respuestas generalizadas y los valores medios de radiación y temperaturas se aparten de las respuestas y valores efectivos. "Conviene observar, sin embargo, que aunque el método se preparó teniendo como objetivo una evaluación mundial del uso potencial de la tierra a nivel continental, es posible aplicarlo, con el grado de detalle necesario, a las exigencias de lugares y cultivos específicos " (FAO, 1981).



**D. ANALISIS DE LAS VARIABLES FISIOEDAFICAS EN RELACION AL CULTIVO
(Cuarta Etapa)**

A partir del conocimiento de los requerimientos edáficos del cultivo así como de las prácticas culturales más aconsejables (riego, mecanización, etc.) para el cultivo se analiza la información disponible sobre aspectos topográficos y edáficos del territorio a zonificar.

Para la ejecución de esta etapa se recurrió al mapa de asociaciones de Sub-grupos de Suelos de Costa Rica (OPSA, 1974) y se reclasificó la información para la hoja de Nicoya en relación al cultivo del sorgo. (Cuadro 2)

Se consideró como suelos adecuados para este cultivo aquellos suelos medianamente profundos a profundos (0,5 a 1 m o más), con buen drenaje (el cultivo no soporta encharcamiento prolongados), textura media (francos).

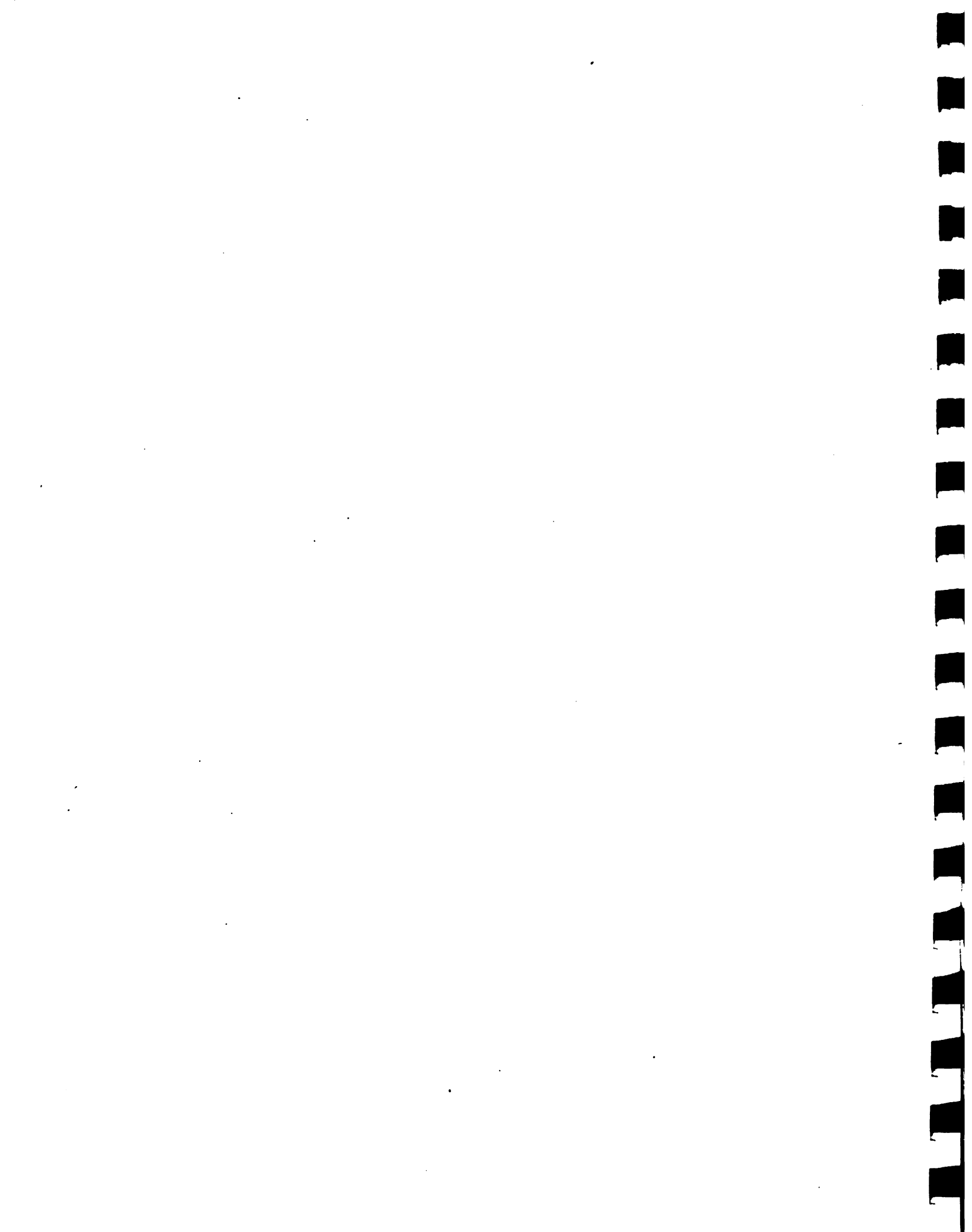
El pH puede oscilar entre 5.5 a 8.5, óptimo 5.5 y 6.5. Por lo general la siembra es mecanizada siendo preferible los suelos planos. Esto es, pendiente adecuada 0-5 por ciento, moderada de 5 a 15 por ciento y no apta > 15 por ciento.

E. SINTESIS CARTOGRAFICA SUCESIVA (Quinta Etapa)

Para la síntesis cartográfica se evaluaron los siguientes mapas: mapa de suelos según aptitud para el cultivo del sorgo, los mapas de temperaturas máxima, mínima y promedio correspondientes a los meses de mayo, junio, julio y agosto. El aspecto hídrico se estudió cuando se define la fecha de siembra del cultivo por medio del análisis frecuencial de precipitación.

F. RESULTADOS FINALES (Sexta Etapa)

Como resultado de la síntesis cartográfica se obtiene el Mapa 1, que constituye la zonificación agroecológica del sorgo de la hoja de Nicoya de la región Chorotega a una escala 1:200.000.



214

Cuadro 2

COSTA RICA: Reclasificación de las unidades del mapa de sub-grupos de suelos, según su aptitud para el cultivo del sorgo. 1/

SUELOS APTOS	SUELOS MODERADOS	SUELOS NO APTOS
Inceptisoles	Inceptisoles	Inceptisoles
I - 20	I - 5 pendiente	I-1 por drenaje
I - 21	I -18 profundidad	I-23 por fragmentos rocosos en el perfil, profundidad y textura
I - 22	I -19 fragmentos en el perfil	
I - 29	(5-20%)	
I - 32	I -24 drenaje	Entisoles
	I -25 textura	E-5 por drenaje
Mollisoles	I -33 Textura	E-6 drenaje
M-1	Mollisoles	Vertisoles
M-2		V-I textura
	M-3 por drenaje	
A-1		

1/ Reclasificación sólo para la hoja titulada Nicoya.



Las unidades delimitadas fueron caracterizadas por un número fraccionario (a/b) con el propósito de facilitar su interpretación. Este número tiene el siguiente significado. En el numerador aparecen dos números; el primer número representa la clasificación térmica o sea señala como es la temperatura del lugar en relación al cultivo del sorgo. El segundo número representa la categoría hídrica obtenida por medio del análisis frecuencial de precipitaciones.

Por otro lado, en el denominador aparece un número acompañado de una letra; el número representa la categoría fisioedáfica y la letra las posibles limitantes que deben ser consideradas para un manejo eficiente del suelo.

Con la finalidad de hacer más accesible la interpretación a los utilizadores de las unidades de zonificación agroecológica, se hizo una jerarquización de las diversas unidades. Las categorías indican el margen de probabilidad para la obtención de rendimientos.

Se contemplaron las siguientes categorías:

1. Muy alta probabilidad de obtener buenos rendimientos
2. Alta probabilidad de obtener buenos rendimientos
3. Regular probabilidad de obtener buenos rendimientos
4. Baja probabilidad de obtener buenos rendimientos
5. Muy baja probabilidad de obtener buenos rendimientos



COMENTARIO FINAL

En el presente trabajo se desarrolla un ejercicio metodológico que introduce algunas técnicas para obtener una mayor precisión en la definición del potencial agroecológico de las distintas regiones del país. Es necesario resaltar la importancia de la definición de la fecha más adecuada para la siembra de los cultivos anuales con el fin de estudiar el clima sólo durante los días que el cultivo se encuentra en el campo.

En este caso se analizó la potencialidad de un sorgo de ciclo corto (95 días) cuya fecha de siembra se ubica alrededor del 1 de mayo.

Se recuerda que este cultivo presenta características particulares que lo hacen más resistente que otros cultivos a la escasez de agua en el suelo, motivo por el cual, la interpretación del análisis frecuencial de precipitación se realiza con mayor flexibilidad.

La metodología se diseñó de tal forma de que pueda ser empleada para zonificar cualquier cultivo anual siguiendo los pasos en ella descritos.



LITERATURA CITADA

CASTRO, V. 1985. Estudio Climático de Costa Rica para la Zonificación Agropecuaria y Forestal. SEPSA-MIDEPLAN. San José, Costa Rica. 52 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. FAO, Roma. 212 p.

FAO. 1981. Report on the agro-ecological zones project. Vol. 3. Methodology and results for Southnd Central America. World Soil Resources Report. N° 48. FAO, Roma 251 p.

FRANQUIN, P. 1973. Analyse agroclimatique en régions tropicales: méthode des intersections et périodes frequentielle de végétation. L'Agronomie Tropicale. 28 N° 6-7.

INFANTE, M; HERNANDEZ, J. 1984. Resumen ecológico de cultivos tropicales Ed. Oriente, Cuba. 131 p.

OFICINA PLANIFICACION SECTORIAL AGROPECUARIA (OPSA) 1979. Manual descriptivo de asociaciones de sub-grupos de suelos de Costa Rica. San José. 236 p.

PROTTI, F; WEISS, J; ROJAS, L. 1985. Zonificación agropecuaria, esquema metodológico y su aplicación al caso de la región Huetar Norte. SEPSA-IICA. 96 p.

ROJAS, O. 1986. Estudios agroclimáticos y zonificación agroecológica de cultivos: Metodología y resultados. Serie Publicaciones Misceláneas. N°A1/CR-86-006, IICA, Costa Rica. 106 p.



ROJAS O, 1985. Estudio Agroclimático de Costa Rica. Serie
Publicaciones Misceláneas N° 617. IICA. San José, Costa Rica.
178 p.



