

S596.7
A38a
e.2.

I

ANALISIS AGROFISICO DE LAS RELACIONES
ENTRE EL NIVEL FREATICO Y LA PRODUCTIVIDAD
DE LOS CULTIVOS Y SU APLICACION AL
SISTEMA HIDROLOGICO BOCONO MASPARRO

POR

MIGUEL ANGEL AGUIRRE

TESIS PRESENTADA PARA COMPLETAR LOS REQUISITOS
NECESARIOS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN SUELOS Y RIEGO

JULIO 1974

CIDIAT

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

MERIDA - VENEZUELA

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

6717

SERBIULA - CIDIAT



S596.7 A38a e2

BIBLIOTECA

RECIBIDO 19 OCT. 1978

DONATIVO

DEDICATORIA

*A mi hijo Miguel Angel Junior, cuya presencia estimula mi
superación continua*

*A mi esposa María Enith que con su comprensión y apoyo
hace posible esa superación*

Mi sincero Agradecimiento:

Al Dr. Aldo Norero Sch., Profesor Guía de este estudio, que sin su decidida ayuda no habría podido realizarse.

A los Drs. Germán Uzcátegui y Roger Amisial, por sugerir el tema y discutir algunos aspectos del trabajo.

Al Dr. Carlos Grassi por su valiosa colaboración, y por haber cedido gentilmente material bibliográfico.

Al Cuerpo de Profesores del Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. (CIDIAT) por sus valiosas enseñanzas.

A la oficina central de Coordinación y Planificación, Dirección de Cooperación Técnica de Venezuela (CORDIPLAN) por la concesión de la beca necesaria para realizar estudios de postgrado en Venezuela.

A la Universidad de Los Andes.

Al Ministerio de Obras Públicas de Venezuela, oficina Guanare, por haber facilitado los datos hidrológicos necesarios para este trabajo.

Al Personal de Administración del CIDIAT y a todos mis compañeros del curso de postgrado en "Suelos Riego y Drenaje" 1973 – 1974. por su amistad y apoyo.

A todos las demás personas que en una u otra forma han colaborado con la realización del presente trabajo.

El Autor

SINOPSIS**ANALISIS AGROFISICO DE LAS RELACIONES
ENTRE EL NIVEL FREATICO Y LA PRODUCTIVIDAD
DE LOS CULTIVOS Y SU APLICACION AL
SISTEMA HIDROLOGICO BOCONO MASPARRO****POR****MIGUEL ANGEL AGUIRRE****MAGISTER SCIENTIAE****PROFESOR GUIA ;****ALDO NORERO. ING. AGR. M.SC.; Ph. D.****CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL
DE AGUAS Y TIERRAS**

Se estudió las relaciones nivel freático – producción mediante un análisis teórico basado en la hipótesis de que la napa freática influye positiva o negativamente sobre la producción de los cultivos.

Se integró estas relaciones en una expresión general que pone de manifiesto el carácter agroecológico del problema y permite calcular la producción en términos de profundidad del nivel freático.

Se realizaron simplificaciones con el objeto de lograr una evaluación más sencilla del problema que permita su aplicación en estudios generales de planificación.

Se investigó la eficiencia del modelo deducido comparandolo con experiencias bibliográficas, justificandose su utilización para efectos de estimar la producción de los cultivos en función del nivel freático.

Se aplicaron las relaciones desarrolladas al sistema hidrológico Boconó—Masparro utilizando a los efectos la información climática, edafológica e hidrológica existente.

Se demostró la posibilidad de utilizar estas expresiones a fines de evaluar sistemas de drenaje y determinar la altura “óptima” de la napa freática desde un punto de vista agronómico.

ABSTRACT

The relationship between the water table level and crop production was theoretically studied based on the general hypothesis that the water table influences production either positively or negatively.

These relationships were integrated to yield a general expression which emphasizes the agroecological implications of the problem. It may be used to calculate crop production as a function of the water table height.

Certain simplifying assumptions were made in order to facilitate its application in the planning stages of drainage projects.

The model was tested using experimental data reported in the literature, and applied to the ecological system of the Boconó and Masparro rivers.

INDICE

I.	INTRODUCCION	1
	A. El problema y su importancia	1
	B. Objetivos	1
II.	REVISION BIBLIOGRAFICA	1
	A. El agua y la producción	1
	B. Napa freática y producción	2
	A. 1. Efecto perjudicial del nivel freático	2
	2. Efecto beneficioso de la napa freática	3
III.	METODICA	5
	A. Teoría y desarrollo de un modelo agrofísico	5
	1. Efecto positivo	5
	a) Flujo ascendente desde una napa freática	5
	b) Flujo límite o máximo desde una napa freática	7
	c) Aporte de agua freática a los cultivos	7
	2. Efecto negativo	11
	a) Profundidad de enraizamiento activo	11
	b) Producción vegetal en función de la absorción mineral	12
	c) Absorción mineral en función del enraizamiento y fertilidad ..	13
	d) Comentarios	15
	e) Casos particulares	17
	B. Verificación Experimental	21
	C. Aplicación al sistema hidrológico Boconó – Masparro	27
	1. Datos e información	27
	2. Procedimiento	28
IV.	RESULTADOS	31
V.	DISCUSION	45

A.	Las fluctuaciones freáticas y la productividad en Boconó Masparro	45
B.	El modelo agrofísico elaborado: sus limitaciones y su utilidad Técnica.	46
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
VII.	RESUMEN	51
VIII.	BIBLIOGRAFIA	53
IX.	APENDICE	57
	Anexo 1 : Material de Trabajo	57
	Anexo 2 : Datos Boconó – Masparro	66
	Anexo 3 : Cálculos Boconó Masparro	66
	Anexo 4 : Análisis de Correlación	77
	Anexo 5 : Prueba estadística	77
X.	LISTA DE SIMBOLOS	80

LISTA DE FIGURAS

No.	TITULO	PAG.
1	Profundidad “óptima” del nivel freático en suelo descubierto	10
2	Profundidad “óptima” del nivel freático en presencia del cultivo	10
3	Zona de subaereación sobre la napa freática	10
4 - 5	Ajuste de datos experimentales de producción de diversos cultivos en función del nivel freático, de acuerdo a la fórmula [44]	23
6	Ajuste de datos experimentales de producción de diversos cultivos en función del nivel freático según la fórmula [47 a]	26
7	Representación gráfica casos 1 y 2	35
8	Representación gráfica caso 3	35
9	Representación gráfica casos 4 y 5	39
10	Representación gráfica caso 6	39
11	Representación gráfica casos 7 y 8	43
12	Representación gráfica caso 9	43
13	Límites superior e inferior de la profundidad “optima” de drenaje	49
A.1.0.	Relación entre la profundidad de la napa freática, la tensión hídrica del suelo y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura muy fina.	58
A.1.1.	Relación entre la profundidad de la napa freática, la tensión hídrica del suelo y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura fina	59
A.1.2.	Relación entre la profundidad de la napa freática, la tensión hídrica del suelo y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura media	60
A.1.3.	Relación entre la profundidad de la napa freática, la tensión hídrica de suelo y la intensidad de ascenso capilar para suelos de textura gruesa	61
A.1.4.	Cálculo de la succión máxima para suelos de textura fina	62
A.1.5.	Cálculo de la succión máxima para suelos de textura media	63
A.1.6.	Cálculo de la succión máxima para suelos de textura gruesa	63
A.1.7.	Relación entre la evaporación relativa y la tensión hídrica del suelo	64
A.1.8.	Relación entre el espesor de la zona de subaereación, la textura del suelo y la demanda evaporadora.	65
A.2.0.	Curvas de retención de humedad, suelos Boconó – Masparro	67
A.2.1.	Fluctuaciones del nivel freático pozo F 10	67
A.2.2.	Fluctuaciones del nivel freático pozo I8 + 400	68

A.2.3.	Fluctuaciones del nivel freático pozo G8	68
A.2.4.	Representación logarítmica de datos de desarrollo radicular de maíz caraota y algodón.	69

LISTA DE CUADROS

No.	CUADRO	Pag.
1	Datos de producción relativa y nivel freático	22
2	Valores de producción relativa y profundidad relativa del nivel freático	25
3	Condiciones que pueden presentarse al analizar la influencia del nivel freático sobre la producción de los cultivos.	31
4	Datos y Cálculos Caso 1	32
5	Datos y Cálculos Caso 2	33
6	Datos y Cálculos Caso 2	34
7	Datos y Cálculos Caso 3	36
8	Datos y Cálculos Caso 4	37
9	Datos y Cálculos Caso 5	37
10	Datos y Cálculos Caso 5	38
11	Datos y Cálculos Caso 6	38
12	Datos y Cálculos Caso 7	40
13	Datos y Cálculos Caso 8	41
14	Datos y Cálculos Caso 8	41
15	Datos y Cálculos Caso 9	42
16	Datos y Cálculos Caso 9	42
17	Productividad promedio de tres cultivos en tres series de suelo del sistema Boconó – Masparro	44
18	Espesor de la zona de subaereación para los cultivos indicados	47
A.2.0.	Datos climatológicos estación “La Marques eña” Hda.	70
A.3.0.	Cálculo de desarrollo radicular de maíz	71
A.3.1.	Cálculo de desarrollo radicular de caraota	71
A.3.2.	Cálculo de desarrollo radicular de algodón	71
A.3.3.	Cálculo de valores mensuales de evaporación máxima de maíz	72
A.3.4.	Cálculo de valores mensuales de evaporación máxima de caraota	72
A.3.5.	Cálculo de valores mensuales de evaporación máxima de algodón	73
A.4.0.	Análisis de correlación	78

I INTRODUCCION

A. EL PROBLEMA Y SU IMPORTANCIA

El desarrollo agrícola basado en la explotación del recurso tierra, depende básicamente del aprovechamiento de las condiciones climáticas y de los recursos hídricos existentes en una determinada región. Clima, agua y suelo representan los tres factores naturales que inter-relacionados hacen posible la actividad vegetativa y la producción de los cultivos.

La intervención del hombre con el fin de mejorar la producción agrícola, ha sido orientada hacia el control del balance hídrico del suelo mediante la instalación de obras de riego y de drenaje, y la selección de los cultivos más aptos a las condiciones de la región.

Mediante el drenaje se elimina el exceso de agua del suelo, con el fin de mantener las condiciones de aereación requeridas para propiciar los procesos fisiológicos relativos al crecimiento radicular y se garantiza al cultivo posibilidades de expansión en profundidad, lo que significa un mayor acceso al agua y a los nutrientes.

La profundidad del nivel freático está íntimamente ligada con el drenaje y la irrigación por ser la causante de una deficiente aereación del suelo, y por otra parte, una fuente potencial de abastecimiento hídrico para los cultivos.

El problema de la profundidad óptima de la napa freática se complica debido al doble efecto que ella ejerce sobre la producción. Además en zonas donde el nivel freático fluctúa mucho, se pueden combinar los dos efectos de manera tal que ciertos cultivos se benefician en el ciclo agrícola, y otros se perjudican por su presencia.

No obstante los grandes adelantos logrados en cuanto a los problemas de drenaje e irrigación, su control se realiza generalmente por la vía de la Ingeniería, sin considerar las variables agronómicas y ecológicas que afectan los cultivos.

Los conocimientos de física del suelo y de la relación agua-suelo-planta-atmósfera se han ampliado considerablemente en los últimos años ofreciendo nuevos elementos de juicio para encarar el problema sobre una base más sólida y mejor fundamentada.

B. OBJETIVOS

El estudio aquí presentado pretende investigar mediante un enfoque agroecológico las relaciones entre el nivel freático y la producción de los cultivos, con el propósito de cuantificar estas relaciones por medio del análisis agrofísico y obtener formulaciones que ofrezcan posibilidades de aplicación técnica.

La necesidad de realizar este estudio se justifica por su aporte al conocimiento de las relaciones agua suelo-planta-atmósfera y por no existir un estudio de esta naturaleza para el área tropical latinoamericana.

II REVISION BIBLIOGRAFICA

A. EL AGUA Y LA PRODUCCION

Las relaciones entre la humedad del suelo y la producción de los cultivos han sido estudiadas desde hace mucho tiempo, y es claro que existe una estrecha relación entre las dos.

En muchas experiencias la relación producción-uso de agua por la planta ha demostrado ser lineal (Wesseling y Van Wijk, 1967; De Witt, 1958; Arkley, 1963; Chang, 1968; García et al., 1970). Existen sin embargo excepciones a esta situación (Roe, 1950; Werner, 1956) que demuestran que la producción aumen-

ta linealmente con la cantidad de agua suministrada solo hasta cierto límite, para luego declinar, insinuando la existencia de otras variables que inciden directamente sobre la producción. Lo mismo ha sucedido al establecer funciones de producción del agua de riego en diversos cultivos y en determinadas condiciones edáficas y de fertilización (Klaster y Wittlesey, 1971; Chang y Cornejo, 1972) con lo cual ha quedado demostrado la condicionalidad de esta relación en otras variables del ambiente.

Sin embargo, existe una concordancia casi general en que la máxima producción de un cultivo se obtiene al aplicar agua en cantidad tal que le permita mantener una intensidad de evaporación igual a la evapotranspiración potencial (Van't Woudt, 1967; Chang y Cornejo, 1972). En otras palabras es preciso satisfacer la demanda evaporadora de la atmósfera para lograr, en la mayoría de los casos, la máxima producción de un cultivo.

B. NAPA FREÁTICA Y PRODUCCION

Los estudios que se han dedicado a la influencia del nivel freático sobre la producción también revelan la dependencia de dicha influencia en las condiciones ecológicas generales en que se plantea el problema. Así, Luthin (1967) indica que la cantidad de agua freática aprovechada por los cultivos puede relacionarse directamente con la profundidad del nivel freático cuando éste es estático. Por el contrario no se ha encontrado aún una solución general satisfactoria en condiciones de nivel freático fluctuante.

Tschapek (1966), por otra parte, afirma que la utilización del agua freática por las plantas depende no solo de la profundidad a que se encuentra sino también de las propiedades del suelo, de las plantas y del agua misma. Zylstra y Lostao (1969) concluyen que el efecto del nivel freático sobre la producción no es directo, sino más bien la suma de varias influencias indirectas, y han demostrado el carácter complejo de la relación.

Es evidente que para cada cultivo, suelo y condición climática, debe existir una profundidad de agua subterránea óptima, en que su aprovechamiento por la planta es máximo. La localización de agua subterránea, tanto demasiado profunda como poco profunda, disminuye sustancialmente la cosecha (Tschapek, 1966; Wesseling y Van Wijk, 1967; Zylstra y Lostao, 1969).

1. EFECTO PERJUDICIAL DEL NIVEL FREATICO

Las relaciones existentes entre un nivel freático elevado y la producción de los cultivos han sido estudiadas desde hace mucho tiempo. Actualmente está suficientemente demostrado que la disminución de la producción se debe principalmente a la reducción del número de raíces funcionales por efecto de la humedad excesiva del suelo (Gilbert, 1959; Van't Woudt y Hagan, 1967).

a) En relación a la aereación.

Existe un acuerdo casi general en que la reducción de la funcionalidad, o número de raíces causada por la napa freática, está relacionada con la deficiencia de aereación del suelo en la zona de desarrollo radicular. Esto ha inducido a varios autores, a investigar las demandas mínimas de aereación de las raíces y los procesos por medio de los cuales se renueva el aire del suelo. Estas investigaciones han revelado que el flujo convectivo es de poca importancia y que el intercambio gaseoso se realiza principalmente por difusión (Luthin; 1967; Norero, 1973).

Para que exista difusión es necesaria la presencia de poros llenos de aire debido a que los conductores bloqueados por películas de agua se vuelven ineficientes en el intercambio entre los gases del suelo y los de la atmósfera exterior. El coeficiente de difusión es, por lo tanto, función de la fracción de poros llenos de aire, existiendo un valor de esta fracción en la cual la difusión cesa completamente. Las experiencias realizadas con el fin de determinar la fracción mínima de poros que garantice el flujo difusivo, demuestran que este valor oscila entre el 10 y el 15 o/o para diferentes cultivos y suelos (Blake y Page, 1948; Taylor, 1949).

b) En relación con otros factores.

No obstante, existen informaciones que indican que el daño producido en las raíces, depende de otros factores como por ejemplo

- 1o.) **Compactación.** El impedimento mecánico a la penetración radicular ha sido expuesto, entre otros, por Philips y Kirkham (1962) quienes comprobaron experimentalmente que la velocidad de elongación radicular decrece linealmente con la densidad de un suelo compactado. Estos autores aseguraron que es el impedimento mecánico y no la aireación, el causante de la reducción del crecimiento radicular en cultivos de semillero. Reconocieron sin embargo, que la aireación podía limitar el crecimiento durante periodos posteriores en el desarrollo vegetativo del cultivo.
- 2o.) **Temperatura.** Cannon (1925) expresa que las demandas de oxígeno del suelo están relacionadas directamente con la temperatura, y que para varios cultivos estudiados la concentración crítica mínima para una temperatura determinada, varía entre el 12 y el 8 o/o del espacio poroso.
- 3o.) **Tolerancia y adaptación.** Las plantas que se desarrollan en presencia de una napa freática elevada se adaptan al exceso de humedad del suelo, desarrollando un sistema radicular superficial (Van't Woudt y Hagan, 1967). La tendencia a la formación de estas raíces adventicias varía con el tipo de cultivo, existiendo evidencias de que su desarrollo asegura la supervivencia de plantas de tomate, o que es tan pequeña, que no es suficiente para garantizar la supervivencia de plantas de tabaco (Kramer, 1951) o de manzano (Heinicke, 1932). Esto parece indicar que las plantas herbáceas estén probablemente mejor capacitadas que las leñosas para formar raíces adventicias. Otra adaptación de los cultivos a la mala aireación del suelo es la tendencia a desarrollar raíces en la base del sistema radicular, las cuales poseen más espacios intercelulares que las desarrolladas en un medio ambiente bien aireado (Kramer, 1951). Gracias a esta modalidad pueden penetrar a la zona de subaireación que existe sobre la napa freática, y aún hasta cierta distancia bajo ella (Fox y Lipps, 1955; Van't Woudt y Hagan, 1967). Las diferencias exhibidas por los cultivos en su tendencia a desarrollar raíces adventicias y/o especiales, puede ser una explicación parcial a la variación de la tolerancia a la inundación observada en diferentes cultivos.
- 4o.) **Misceláneos.** En los últimos años se ha observado que las demandas mínimas de las plantas en cuanto a la aireación del sistema radicular, depende también de otras variables como la concentración de bióxido de carbono en el suelo (Wesseling y Van Wijk, 1967); el tipo de desarrollo radicular, la fase de desarrollo vegetativo (Letey, 1962; Williamson, 1964); duración de la inundación (Rai et al., 1971), y fertilidad del suelo (Hoogerkamp, 1967; Zylstra y Lostao, 1969).

2. EFECTO BENEFICIOSO DE LA NAPA FREÁTICA.

A pesar de que la mayoría de los autores concuerdan en que el efecto del nivel freático sobre la producción suele ser negativo, debido primordialmente a la restricción del sistema radicular por déficit de aireación, es indudable que la napa freática ejerce también un efecto positivo sobre la producción como consecuencia de su aporte al balance hídrico del suelo.

En realidad, la posibilidad de satisfacer los requerimientos hídricos de las plantas manteniendo la napa freática a cierta profundidad ha sido estudiada últimamente y es generalmente reconocida como subirrigación. La importancia de considerar el agua subterránea como fuente de abastecimiento hídrico está demostrada por la declinación gradual de la producción en Holanda en los últimos decenios, como consecuencia de la aplicación de sistemas de drenaje demasiado profundos (Pijls, citado por Van't Woudt y Hagan, 1967).

Además existen evidencias experimentales que señalan una marcada influencia de la subirrigación sobre la producción (Hooghoudt, 1952; Lipps y Fox, 1956). Estas demuestran que una napa freática aún bastante profunda es capaz de abastecer con cantidades considerables de agua a los cultivos, si bien con dificultad cada vez mayor para extraerla a medida que la napa freática se profundiza.

Al considerar la napa freática como función de producción, se debe tomar en cuenta el aporte

de agua elevado por ascenso capilar desde la zona de saturación hasta la zona de desarrollo radicular. Desde hace varios años se han venido realizando experiencias tendientes a determinar la altura hasta la cual asciende agua por este mecanismo. (Verhoeven, citado por Wesseling y Van Wijk, 1967). Sin embargo, no solo es importante apreciar la magnitud de este ascenso. Lo que reviste particular interés es conocer la velocidad con que este se efectúa, ya que ella determinará si la humedad del suelo puede ser repuesta con la celeridad suficiente para satisfacer la demanda de absorción de las raíces.

En los últimos años se ha tratado de cuantificar la velocidad del flujo ascendente por diferentes procedimientos, como por ejemplo el indicado por Groot y Dejaeger (1969), el cual se basa en un parámetro que expresa la capacidad total de aporte del suelo y de la napa freática. Otro procedimiento es el indicado por Van den Berg y Visser (1973) basado en las características físicas del suelo y en la demanda evaporadora de la atmósfera. Sin embargo, los aportes más valiosos para determinar la velocidad de ascenso capilar, se basan en la aplicación de la ecuación de difusión de agua al flujo no saturado en el suelo como lo indican Zylstra y Salinas (1969) y Norero (1973). Para ello se analiza el proceso de elevación capilar en régimen de flujo permanente y se utilizan funciones que relacionan la humedad con la conductividad capilar (Kirkham, 1946; Gardner, 1958; Wind, 1955). Así, ha sido posible cuantificar las relaciones entre la velocidad de elevación capilar, la profundidad del nivel freático y la succión de humedad del suelo. Estas relaciones han sido reportadas por Gardner (1958), Gardner y Fireman (1958), Talsma, citado por Zylstra y Lostao (1969), y Rijtema, citado por Grassi (1969), para suelos homogéneos y Willis (1960) para suelos heterogéneos.

No obstante el gran número de estudios y experiencias realizados hasta la actualidad, no es posible determinar con certeza la profundidad freática necesaria para lograr la máxima producción de un cultivo, debido al carácter complejo de la relación nivel freático-producción que resulta del balance de los efectos beneficioso y perjudicial indicados.

Se ha señalado que la disminución de la producción por efecto de una napa freática elevada puede resultar mucho mayor que la de una napa freática demasiado baja (Van't Woudt y Hagan, 1967). Esta consideración más la alternativa de satisfacer el déficit hídrico del suelo mediante la irrigación, ha determinado que en la mayoría de los casos se fije la profundidad óptima, basándose en las demandas de aereación del suelo. En otras oportunidades, esta profundidad ha sido determinada considerando el aporte freático requerido para satisfacer la demanda evaporadora (Wind, 1955; Van't Woudt y Hagan, 1967), sin preocuparse de la aereación de los estratos superiores del suelo.

Esta situación destaca la importancia de buscar una solución de validez más general. Esta debe ser capaz de satisfacer adecuadamente las dos demandas, si ello es posible, o escoger una alternativa que satisfaga una de ellas sin descuidar la otra.

- 1.) Para esto es beneficioso abordar el estudio de las relaciones producción vegetal nivel freático en un contexto agroecológico, es decir como un fenómeno condicionado por las mutuas interacciones entre la planta y los componentes físicos del ambiente agrícola: suelo, agua y clima (Van der Goor, 1973).
- 2.) Este enfoque agroecológico ha sido recientemente aplicado para analizar las relaciones entre la humedad del suelo y la transpiración de los cultivos (Norero 1973), y para desarrollar una teoría agrofísica de la producción vegetal, en particular en relación con el abastecimiento de agua (Norero, 1972). La mayor importancia de estos estudios radica en haber establecido relaciones cuantitativas entre los principales procesos del crecimiento vegetal y los factores del medio ambiente.

Resulta de interés por lo tanto, aplicar el concepto agroecológico y el análisis agrofísico al estudio de las relaciones nivel freático-producción, intento que no ha sido realizado hasta el presente.

III METODICA

A: TEORIA Y DESARROLLO DE UN MODELO AGROFISICO

El propósito final es estudiar las relaciones napa freática-producción, mediante un enfoque agroecológico, es decir como un fenómeno condicionado por las relaciones suelo-agua-planta-atmósfera, dentro de una concepción integral del ambiente vegetal natural. Con este propósito, se tratará de elaborar una expresión, que ponga de manifiesto los factores más relevantes al problema, la naturaleza de sus interrelaciones y la magnitud de su influencia.

El método agrofísico consiste en aplicar los principios fundamentales de las Ciencias Naturales y combinarlos con métodos matemáticos. De este modo se elaborará una teoría cuantitativa del fenómeno expresable en lenguaje matemático y capaz de proporcionar relaciones generales a partir de un número limitado de experiencias. Así, la teoría puede aplicarse a circunstancias que difieren de aquellas presentes en los experimentos originales, lo cual es difícil de lograr con métodos estrictamente empíricos.

1. EFECTO POSITIVO

- a) Flujo ascendente desde una napa freática.

La descripción matemática del flujo en condiciones no saturadas es complicada, debido a que la conductividad capilar depende del contenido de humedad del suelo, es decir, no es constante. Esto conduce al planteamiento de ecuaciones diferenciales de difícil o compleja solución.

El análisis resulta más sencillo si el proceso de elevación capilar del agua desde un nivel freático hasta la superficie del suelo se trata como un flujo permanente (Zylstra y Salinas, 1969; Norero, 1973). En el caso del régimen permanente la ecuación de flujo unidimensional, toma la siguiente forma:

$$(1) \quad F = -K \frac{d\Phi}{dx}$$

y en particular, para un flujo vertical, descomponiendo el potencial hídrico total en sus componentes mátrico y gravitacional:

$$(2) \quad F = \frac{-K d(-S+z)}{dz} = K \left(-\frac{dS}{dz} - 1 \right)$$

en la que:

F es el flujo capilar ascendente considerado constante.

K es la conductividad capilar

Φ es el potencial hídrico total

-S es el potencial mátrico

z es el potencial gravitatorio; también la distancia vertical sobre la napa freática.

El signo negativo en (1) indica que el flujo es ascendente.

Para obviar el signo negativo asociado al potencial mátrico, **S**, en lo sucesivo se escribirá simplemente, **S**, con la designación de succión o tensión.

Por (2) se obtiene:

$$(3) \quad dz = \frac{dS}{1 + F/K}$$

La conductividad capilar puede ser relacionada con la succión, **S**, por medio de las siguientes expresiones empíricas indicadas por Gardner (1958):

$K = + aS + b$	Richard (1931)
$K = a/(S - 1000)$	Hallaire (1949)
$K = aS^{-3/2}$	Wind (1955)
$K = a/S$	Remson y Fox (1955)
$K = a \exp(-cS)$	Wind (1955)
$K = a/(S^n + b)$	Gardner (1958)

La relación más generalizada y la que describe un mayor número de situaciones diferentes es la de Gardner (Gardner y Fireman, 1958; Willis, 1960), en la cual la relación a/b representa la conductividad hidráulica y n varía con la textura del suelo. Este último acusa valores de 1.5 en suelos pesados y aumenta hasta 4 o más para arena gruesa (Gardner, 1958).

$$\text{Combinado } \left[\begin{array}{l} 3 \\ 4 \end{array} \right] \text{ y } \left[4 \right] = : \quad K = a/(S^n + b)$$

$$dz \cdot \frac{dS}{1 + F/a(S^n + b)} = \frac{dS}{\alpha S^n + \beta}$$

Se obtiene:

$$\left[5 \right] \quad dz = \frac{\alpha dS}{S^n + \beta} \quad \text{en la que } \alpha = F/a \text{ y } \beta = \alpha b + 1$$

Integrando 5 entre $z = 0$ (superficie del suelo) y $z = W$ (profundidad de la napa freática), se obtiene:

$$\left[6 \right] \quad \int_{z=0}^{z=W} dz = \int_{S_s}^{S_w} \frac{dS}{\alpha S^n + \beta}$$

en la cual:

S_w es la succión a la profundidad del nivel freático; es igual a cero porque el suelo está saturado.

S_s es la succión en la superficie del suelo.

Las soluciones particulares de $\left[6 \right]$ varían de acuerdo al valor de n , y al tipo de suelo considerado:

1o) Para suelos arcillosos pesados, $n = 1$ y $n = 1.5$

$$\left[7 \right] \quad W = \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha S_s + \beta) - \frac{1}{\alpha} \ln \beta$$

$$\text{y } \left[8 \right] \quad W = \frac{2}{\alpha} \left\{ \frac{1}{6r} \ln \left(\frac{r^2 - r\sqrt{S_s + S_s} + S_s}{(r + S_s)^2} \right) + \frac{1}{r\sqrt{3}} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2S_s - r}{r\sqrt{3}} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}\alpha r} \operatorname{tg}^{-1} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \right) \right\}$$

2o) Para suelos arcillosos, $n = 2$,

$$\left[9 \right] \quad W = \frac{1}{\sqrt{\alpha\beta}} \operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} S_s$$

3o) Para suelos de texturas medias, $n = 3$

$$\left[10 \right] \quad W = \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{1}{6r^2} \ln \left(\frac{(r + S_s)^2}{r^2 - rS_s + S_s^2} \right) + \frac{1}{r^2\sqrt{3}} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2S_s - r}{r\sqrt{3}} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}\alpha r^2} \operatorname{tg}^{-1} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \right) \right\}$$

4o) Para suelos de texturas livianas, $n = 4$

$$(11) \quad W = \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{1}{4\rho^3\sqrt{2}} \ln \left(\frac{Ss^2 + \rho}{Ss^2 - \rho} \frac{Ss\sqrt{2} + \rho^2}{Ss\sqrt{2} + \rho^2} \right) + \frac{1}{2\rho^3\sqrt{2}} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\rho Ss\sqrt{2}}{\rho^2 - Ss^2} \right) \right\}$$

donde: $\rho^3 = \beta/\alpha$
 $\rho^4 = \beta/\alpha$

La representación gráfica de las relaciones existentes entre la profundidad del nivel freático, W , el flujo capilar, F , y la succión del suelo, S , indicada en las fórmulas [8], [9], [10], y [11] se representan en las figuras A.1.0., A.1.1., A.1.2. y A.1.3., anexados en el apéndice.

b) Flujo límite o máximo desde una napa freática

En las figuras indicadas se puede observar que el flujo tiende asintóticamente a un valor final, independizándose de la tensión hídrica en la superficie del suelo y quedando solo en función de la profundidad de la napa. Este valor máximo del flujo capilar, puede ser calculado por la siguiente expresión (Gardner, 1958):

$$(12) \quad F_x = CW^{-n}$$

Para diferentes suelos, la ecuación [12] toma las siguientes formas:

1o) en suelos de textura arcillosa pesada:

$$(13) \quad F_x = 90.5 W^{-3/2}$$

2o) en suelos de textura arcillosa:

$$(14) \quad F_x = (1.5) 10^3 W^{-2}$$

3o) en suelos de textura franca:

$$(15) \quad F_x = (1.23) 10^5 W^{-3}$$

4o) en suelos de textura arenosa:

$$(16) \quad F_x = (9.12) 10^6 W^{-4}$$

F_x queda expresado en $\text{cm}/\text{día}$ Si W se mide en cm :

c) Aporte de agua freática a los cultivos

De lo anterior se desprende que para satisfacer la evaporatividad atmosférica, E_x , de un suelo descubierto solo con el ascenso y aporte capilar de modo que $F = E_x$, la napa freática debe encontrarse a una determinada profundidad mínima que se designará por sW_x (Figura 1).

Esta profundidad, sW_x , será función de la textura del suelo, del potencial hídrico y del flujo requerido. Puede ser calculada mediante las fórmulas [8], [9], [10] y [11] o por interpretación en las figuras correspondientes (A.1.0., A.1.1., A.1.2. y A.1.3., apéndice).

De acuerdo a las características edáficas y climatológicas existentes, pueden presentarse dos casos:

- 1o) si $W \leq S_w x$; $F = E_x$ y se satisface completamente la demanda evaporadora
 2o) si $W > S_w x$; $F < E_x$ y el flujo capilar no es suficiente para satisfacer la demanda.

Si en el análisis anterior se introduce ahora un cultivo cuya profundidad radicular es igual a D , y no existen más aportes hídricos a la planta que el de la napa, existirá una evapotranspiración real, E , que podrá ser igual o inferior a la potencial, E_x , según las características del suelo, del clima y del cultivo.

El agua absorbida por las raíces será función de la succión hídrica del suelo, S , la cual será mayor en los estratos superiores y disminuirá a medida que se aproxima al nivel freático. Es posible determinar un valor promedio ponderado de la succión del suelo, \bar{S} , en la zona de enraizamiento, y de este modo considerar que la tensión hídrica es uniforme en toda la profundidad D . En esta forma, a los efectos del flujo, el estrato de suelo que contiene el sistema radicular, puede considerarse equivalente a un plano horizontal, donde $S = \bar{S}$, y situado en D .

Para que la evapotranspiración del terreno cubierto satisfaga completamente la demanda evaporadora, será necesario que la tensión hídrica existente a la profundidad D , S_d , reúna las siguientes condiciones:

- 1o) que el flujo ascendente desde la napa freática hasta D sea igual a la demanda evaporadora, $F = E_x$, para lo cual la napa freática debe encontrarse a una profundidad $S_w x$ medida desde D ;
 2o) que el agua así ascendida hasta D sea evapotranspirada en su totalidad, $E = E_x$.

Ahora bien, como la intensidad de evapotranspiración depende del potencial hídrico del suelo, debe indagarse cual ha de ser su valor promedio en la zona de enraizamiento o en el plano D para asegurar una extracción del agua freática igual a la demanda evaporadora.

La relación entre la evaporación relativa de los cultivos, E/E_x , y la humedad del suelo es descrita por Norero (1973) mediante la siguiente expresión.

$$(17) \quad \frac{E}{E_x} = \frac{1}{1 + (S/S^*)^k}$$

en la cual:

- E es la evaporación real
 E_x es la evaporación máxima del cultivo
 \bar{S} es la succión promedio de la zona de enraizamiento
 S^* es la succión del suelo cuando $E = 0.5 E_x$
 k es un coeficiente empírico, pero susceptible de estimarse mediante ciertos parámetros climáticos, fisiológicos y edáficos, como se verá mas adelante.

La expresión (17) puede utilizarse para describir en términos cuantitativos la aprovechabilidad del agua del suelo, considerando las siguientes igualdades, (Norero, 1973):

$$(18) \quad k = \frac{2.56}{\log. (S_{mi}/S_{mx})}$$

$$(19) \quad S^* = \sqrt{(S_{mi}) (S_{mx})}$$

en las que:

S_{mx} es la tensión hídrica máxima, necesaria para asegurar la satisfacción total de la demanda. Fué definida por Norero (1973) como la succión a la cual $E = 0.95 E_x$.

S_{mi} es la tensión hídrica mínima, a la cual la evaporación se hace mínima. Fué de-

finida por Norero (1973) como la succión a la cual $E = 0.05 \text{ Ex}$

La naturaleza dinámica y flexible de este concepto de "aprovechabilidad" está en el hecho de que tanto **Smx** como **Smi** varían de acuerdo a las circunstancias climáticas, de suelo y de cultivo, lo que constituye el concepto agroecológico

Mediante un tratamiento agrofísico, Norero (1973), ha elaborado las siguientes expresiones para estimar las magnitudes de Smx y Smi:

$$\begin{aligned} (20) \quad & \text{Smx} + (8 \text{ Ex}/D) \text{Smx}^n = 10 - \text{Ex} \\ (21) \quad & \text{Smi} + (4 \text{ Ex}/D) \text{Smi}^n = S\pi \end{aligned}$$

en las que **D** es la profundidad radicular, **n** una constante empírica (Gardner, 1958) y **Sπ** es la succión osmótica del cultivo.

La solución de (20) se facilita con ayuda de nomogramas preparados por Norero (1973), (figuras A.1.4., A.1.5 y A.1.6. Apéndice). Para fines técnicos puede considerarse que **Smi** es igual a 15 barías. De esta manera, es posible determinar la relación entre la evaporación relativa y la tensión hídrica del suelo a partir de las fórmulas (17), (18), (19) y (20). La figura A.1.7, preparada por Norero (1973) facilita la resolución de (17), pues se requiere solo el cálculo previo de **Smx**, siempre que se adopte **Smi** = 15 barías.

De lo anterior se desprende entonces que la condición necesaria y suficiente para que el agua ascendida hasta la zona de enraizamiento sea evaporada en su totalidad es que $S_d = S_{mx}$.

El uso de un valor promedio de la succión del suelo para toda la zona radicular, transforma el plano **D** en una virtual superficie evaporante, o extractora de humedad, como si fuera una superficie de suelo descubierto. Por lo tanto, la profundidad de la napa freática a la cual se satisface $S_d = S_{mx}$, ya no es sW_x , como en esta última superficie, sino ${}^cW_x + D$. Definiendo esta nueva profundidad "óptima" del nivel freático, en presencia de cultivo, por cW_x , se tiene:

$$(22) \quad {}^cW_x = {}^sW_x + D$$

De acuerdo a este planteamiento, cabe esperar entonces una de las alternativas siguientes:

1o) si $W \leq {}^cW_x$ y $S_d = S_{mx}$, entonces $E = \text{Ex}$

2o) si $W > {}^cW_x$ y $S_d > S_{mx}$, entonces $E < \text{Ex}$.

Esto hace posible relacionar la profundidad de la napa freática con la evaporación relativa de un cultivo. A su vez, mediante la relación entre esta última y la productividad se puede estimar la influencia de la profundidad del nivel freático sobre la producción de los cultivos. Para ello puede utilizarse la fórmula propuesta por Norero (1972).

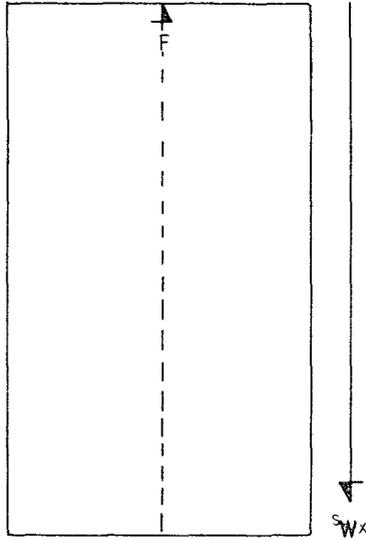
$$(23) \quad \frac{P}{P_x} = 1.45 \left(\frac{E}{\text{Ex}} \right)^{0.5} - 0.45$$

en la cual **P** es la producción obtenida cuando la evaporación real es **E**, y **P_x** es la producción máxima, que se obtiene cuando la evaporación real es igual a la potencial, $E = \text{Ex}$.

En síntesis, el análisis precedente permite **afirmar** que:

- 1) cuando $W \leq {}^cW_x$; $S = S_{mx}$. En estas condiciones la evapotranspiración real será igual a la evaporación máxima ($E = \text{Ex}$) y la producción no se verá restringida por escasez de agua ($P = P_x$).
- 2) cuando $W > {}^cW_x$; $S > S_{mx}$. En estas circunstancias la evapotranspiración real se-

FIGURA 1

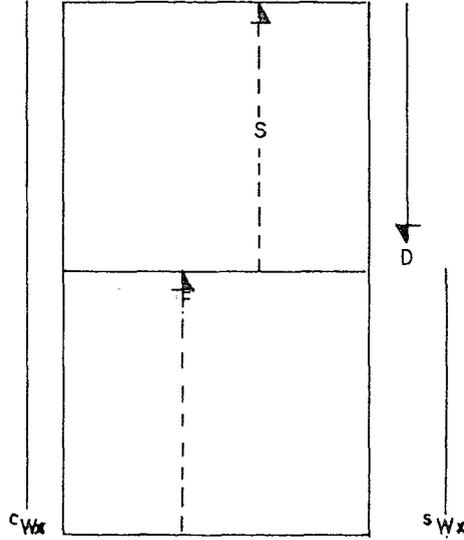


PROFUNDIDAD :

"OPTIMA" DEL NIVEL FREATICO

EN SUELO DESCUBIERTO (S_{wx})

FIGURA 2

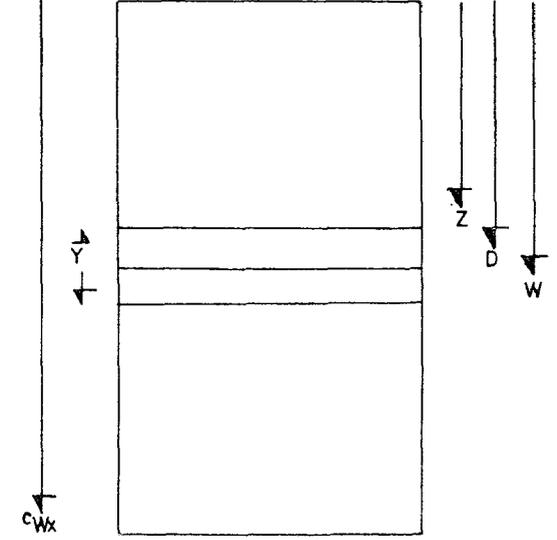


PROFUNDIDAD :

OPTIMA DEL NIVEL FREATICO

EN PRESENCIA DE CULTIVO (c_{wx})

FIGURA 3



ZONA DE :

SUBAIREACION, Y, SOBRE

LA CAPA FREATICA

ra menor que la potencial, es decir $E' > E_x$. La influencia que el insuficiente flujo freático tendrá sobre la producción, si no existen otras fuentes de agua, puede estimarse calculando primero el flujo freático, E , mediante las relaciones (8), (9), (10) y (11) de acuerdo con la textura del suelo. Luego se calculará la relación E/E_x , utilizando la expresión (17), y por último, la producción relativa por medio de la fórmula (23)

2. EFECTO NEGATIVO

En el análisis anterior se determinó la influencia del nivel freático sobre la producción cuando éste es considerado como una fuente de aporte de agua para el desarrollo de los cultivos. Allí se ha señalado que la demanda evaporadora es satisfecha totalmente cuando la profundidad de la napa freática y la succión hídrica del suelo tienen ciertos valores que pueden ser determinados mediante las expresiones propuestas. Sin embargo, cuando la napa freática se encuentra a una profundidad menor que la anterior, es decir más cerca de la superficie del suelo, $W < C_w x$ (figura 3), la producción de los cultivos se verá afectada por el menor enraizamiento Z (figura 3), debido a la presencia de una zona de insuficiente aereación o subaereación Y , (figura 3), inmediatamente sobre la napa freática.

a) Profundidad de enraizamiento activo

Algunos autores (Wesseling y Van Wijk, 1967) basados en sus experiencias han afirmado que las raíces no pueden penetrar a una profundidad mayor que aproximadamente 30 centímetros sobre la napa freática. Sin embargo, este valor no puede ser considerado de validez general, ya que el espesor de la zona sobre el nivel freático desfavorable al desarrollo radicular dependerá también de las condiciones propias del suelo y del clima. Es imprescindible calcular su espesor como paso previo para determinar la profundidad de enraizamiento activo, que permitiría una napa freática, antes de intentar cuantificar su efecto sobre la producción de los cultivos.

Como ya se mencionó, varias experiencias han mostrado que si el contenido de aire en el suelo oscila entre un 8 o/o y un 12 o/o, o menos, del volumen poroso total, el crecimiento radicular cesa en la mayoría de las plantas cultivadas (Blake y Page, 1948; Taylor, 1949). A los fines de este análisis, se definirá la profundidad de enraizamiento "útil" o "activo", como aquella en la cual la proporción del volumen poroso no ocupado por agua es igual o mayor al 10 o/o.

Adoptado este valor, la zona de subaereación, queda definida como la región del perfil que se extiende desde el nivel freático, donde el potencial hídrico es cero, saturación total, hasta la profundidad donde el contenido volumétrico de humedad es el 90 o/o del volumen poroso. Este contenido "crítico" de humedad, h_{crit} , es sencillamente:

$$(24) \quad h_{crit} = h_{sat} - 0.10$$

en la cual h_{sat} es el contenido volumétrico de humedad a saturación

El contenido crítico de humedad, depende de la textura y estructura, puesto que es una propiedad determinada por la geometría porosa del suelo. A su vez, por medio de la curva característica de humedad, se puede determinar el valor de la succión o tensión hídrica crítica, S_{crit} , que corresponda a esa humedad límite para el desarrollo o actividad radicular.

Esta relación es de particular importancia, puesto que conocida la succión crítica de aereación, puede determinarse el espesor de la zona de subaereación para distintas condiciones de evaporatividad atmosférica y textura de suelo, mediante las figuras A.1.0., A.1.1., A.1.2. y A.1.3. (Apendice, Anexo 1). En efecto, en éstas, el grosor de la región de insuficiente aereación corresponde a los valores de la "profundidad" del nivel freático, W , indicado en las ordenadas, donde se interceptan la succión crítica, indicada en las abscisas, y el flujo freático, $F = E_x$.

De esta manera, se ha calculado la altura sobre el nivel freático hasta donde la aereación será inadecuada para la actividad radicular para diferentes texturas de suelo y evaporación máxima. Estos valores, en centímetros, están listados a continuación:

Evaporatividad (mm/día)	Suelos		
	Arcillosos	francos	arenosos
0	45	14	4
0.5	43	14	4
1	40	14	4
2	36	14	4
3	32	14	4
4	29	14	4
5	27	14	4
6	25	14	4
7	23	14	4
8	22	14	4
9	21	14	4
10	20	14	4

Estos cálculos demuestran que el grosor de la zona de raíces existente sobre el nivel freático depende de la demanda evapotranspiratoria en suelos pesados, pero es independiente de ella en suelos de textura franca o a arenosa (Figura 4). Los datos obtenidos se han contrastado con estos resultados con el fin de validar la estimación de estrés en Y, de la zona desfavorable al enraizamiento.

b) Producción vegetal en función de la absorción mínima

En general, la relación entre la producción y la absorción de un elemento esencial, cuya insuficiencia le confiere el carácter de factor limitante, puede expresarse por medio de la ecuación de Mitscherlich:

$$(25) \quad P/P_x = 1 - \exp \left[-c(A/A_x) \right]$$

en la cual,

- P es la producción obtenida con la absorción de A unidades del elemento limitante.
- P_x es la producción máxima obtenida cuando se absorben A_x unidades del elemento limitante, con lo cual se subsana la deficiencia.
- c es un coeficiente.
- P/P_x es la producción relativa obtenida con el suministro relativo, A/A_x, del elemento esencial.

En particular si el cultivo enraza hasta una profundidad D, cuando no exista ningún factor adverso que restrinja su crecimiento, logrará extraer A_d unidades del elemento escaso y la producción correspondiente será P_d. Si A_d es inferior a A_x, el cultivo no logrará la producción máxima, P_x. En términos relativos, P_d/P_x, se puede entonces de acuerdo con

(25), escribir así:

$$(26) \quad P_d/P_x = 1 - \exp \left[-c(A_d/A_x) \right]$$

La cantidad necesaria, A_x, para subsanar el déficit del elemento escaso se deduce de (26) de la manera siguiente:

$$\exp \left[-c(A_d/A_x) \right] = 1 - P_d/P_x$$

$$-c(A_d/A_x) = \ln(1 - P_d/P_x)$$

$$(27) \quad A_x = \frac{-cA_d}{\ln(1 - P_d/P_x)}$$

Si, por otra parte, el cultivo sufre restricción de su desarrollo radicular, por ejemplo debido a la asfixia producida por una napa freática superficial, y logra enraizar no hasta **D**, como lo haría en condiciones normales, sino solo hasta una profundidad **Z**, $Z < D$. La cantidad total del elemento esencial que podrá absorber, **Az**, será menor que **Ad**. En esta situación, se logrará también una producción **Pz**, menor que **Pd**, y por supuesto que **Px**, y la proporción en que ésta se verá afectada puede, según [25], ser expresada así:

$$[28] \quad Pz/Px = 1 - \exp \left[-c (Az/Ax) \right]$$

Lo que realmente interesa en este análisis, es relacionar las producciones **Pz** y **Pd**, entre sí, es decir, la que acusa la influencia de la napa y la que se obtendría en ausencia de dicha influencia, y ambas bajo una misma condición dada de fertilidad del suelo. La relación entre ellas se obtiene combinando las ecuaciones [26] y [28].

$$[29] \quad Pz/Pd = (Pz/Px) (Px/Pd) = 1 - \exp \left[-c (Az/Ax) \right] (Px/Pd)$$

$$Pz/Pd = \frac{1 - \exp \left[-c (Az/Ax) \right]}{Pd/Px}$$

La cantidad total de un elemento esencial, **Ax**, requerida por el cultivo para alcanzar una producción máxima, **Px**, es difícil de estimar a priori. Es conveniente, por eso, eliminar este término en [29], lo cual se logra introduciendo en ella la ecuación [27]. En efecto:

$$Pz/Pd = \frac{1 - \exp \left[\frac{-cAz}{-cAd/\ln(1 - Pd/Px)} \right]}{Pd/Px}$$

$$Pz/Pd = \frac{1 - \exp \left[Az/Ad \ln (1 - Pd/Px) \right]}{Pd/Px}$$

y como:

$$\exp \left[Az/Ad \ln (1 - Pd/Px) \right] = (1 - Pd/Px)^{Az/Ad}$$

se tiene finalmente:

$$[30] \quad Pz/Pd = \frac{1 - (1 - Pd/Px)^{Az/Ad}}{Pd/Px}$$

La ecuación 30 expresa que la influencia que ejerce un factor que perjudica el enraizamiento vegetal sobre la producción depende:

- 1o) de la magnitud de la restricción en el suministro de un elemento esencial por esta causa, con respecto al suministro posible si no existiese esa limitación, **Az/Ad**, y
- 2o) de la magnitud de la deficiencia del elemento esencial en el suelo, nivel de fertilidad. Este déficit está simbolizado por la expresión, $(1 - Pd/Px)$.
- c) Absorción mineral en función del enraizamiento y fertilidad.

Las ecuaciones indicadas, y en particular la [30], se aplican a la absorción mineral total. Como se sabe, la absorción mineral varía en el tiempo durante todo el desarrollo vegetativo, según evoluciona el enraizamiento, y de acuerdo con la fertilidad de los diferentes estratos del perfil explorados por las raíces.

En un instante dado de tiempo **dt**, puede suponerse que la intensidad de absorción, **m**, de un elemento mineral deficitario, en una pequeña sección de espesor Δz , en el perfil, será

proporcional a la concentración de raíces, r , y a la concentración disponible del elemento, Q , es decir:

$$(31) \quad m = Kr\rho Q$$

en la cual:

- k es el coeficiente de proporcionalidad
- r es la masa de raíces por unidad de volumen de suelo (gr/c.c.), tal como podría ser determinado, por ejemplo, por muestreo directo en el campo, en volúmenes conocidos extraídos del suelo.
- Q es la masa disponible del elemento por unidad de peso del suelo (gr/gr), medida por ejemplo, por análisis químico.
- ρ es la densidad del suelo donde se miden r y Q (gr/c.c.).

Luego, en un instante dado de tiempo dt , durante el desarrollo del cultivo, la intensidad de extracción total del elemento, $A'd$, hasta una profundidad máxima de enraizamiento, D , será igual a la suma de las contribuciones de cada estrato de espesor infinitamente pequeños dz , entre la superficie ($z = 0$) y el extremo de la zona radicular ($z = D$):

$$(32) \quad A'd = \int_0^D mdz = K \int_0^D r\rho Q dz$$

El mantener r y Q dentro del integral, expresa las características anisotrópicas del suelo y del cultivo.

Si en un instante dado de tiempo dt , durante el desarrollo del cultivo, ascendiera una napa freática hasta un nivel $Z = W$, al punto de asfixiar parte del sistema radicular, la absorción total, $A'z$, del elemento se verá limitada a una profundidad Z , $Z < D$, que podrá ser mayor, menor o igual que la profundidad de la napa freática, W , según las características del cultivo. En este caso:

$$(32a) \quad A'z = \int_0^Z mdz = K \int_0^Z r\rho Q dz$$

En caso de la ausencia de napa freática, la acumulación total del elemento deficiente, Ad , durante todo el período de desarrollo del cultivo tc , por ejemplo, entre siembra y cosecha, será igual a la suma de todas las cantidades $A'd$ extraídas en ese lapso de tiempo:

$$(33) \quad Ad = \int_0^{tc} (A'd) dt = K \int_0^{tc} \int_0^D (r\rho Q) dz dt$$

En presencia de una napa freática fluctuante que perjudique el desarrollo radicular, la acumulación total del elemento deficiente, Az , en igual período de tiempo tc , será:

$$(33a) \quad Az = \int_0^{tc} (A'z) dt = K \int_0^{tc} \int_0^D (r\rho Q) dz dt$$

Relacionando (33) y (33a) se obtiene:

$$(34) \quad \frac{Az}{Ad} = \frac{\int_0^{tc} \int_0^Z r\rho Q dz dt}{\int_0^{tc} \int_0^D r\rho Q dz dt}$$

y finalmente, sustituyendo (34) en (30) se obtiene la expresión general buscada:

$$[35] \quad \frac{P_z}{P_d} = \frac{1 - (1 - Pd/P_x) \frac{\int_0^{tc} \int_0^z r \rho Q dz dt}{\int_0^{tc} \int_0^z r \rho Q dz dt}}{Pd/P_x}$$

d) Comentarios:

En [35], P_d es la producción obtenida cuando no existe restricción radicular por un nivel freático fluctuante. Esta producción estará influida, entre otros factores, por la fertilidad del suelo en la zona de enraizamiento. Si hay escasez de uno o más elementos, el índice de suficiencia mineral estará expresado por la razón Pd/P_x .

Según el "principio del mínimo", de Liebig, citado por Norero (1973a), P_x en [35] sería la producción obtenible si se subsana la deficiencia del elemento que está en la condición más deficitaria. La relación Pd/P_x , podría obtenerse por ejemplo, mediante el diagnóstico foliar debidamente calibrado, por medio del cual se identificaría el elemento en mínimo. La ecuación [35] se referiría entonces, en particular a este elemento. Puede darse el caso, sin embargo, que mediante el diagnóstico foliar, dos o más elementos acusen una situación insuficiente, aún cuando uno de ellos resulte ser claramente limitante. Por ejemplo el diagnóstico nutricional del cultivo, podría supuestamente revelar que:

$$(Pd/P_x)_K = 0.55; \text{ para potasio}$$

$$(Pd/P_x)_N = 0.60; \text{ para nitrógeno}$$

$$(Pd/P_x)_P = 0.65; \text{ para fósforo}$$

En este caso, el elemento potasio se presentaría como el más limitante, puesto que solo permitiría obtener un 55 o/o del máximo, en tanto que el fósforo y el nitrógeno permiten porcentajes más altos de producción. Sin embargo, se presenta la siguiente interrogante: si existe un nivel freático fluctuante, las raíces, al ser parcialmente asfixiadas, tendrán menos opción de absorber el potasio, nitrógeno y fósforo necesarios para su nutrición. Si el potasio, aún en condiciones de amplio desarrollo radicular, ya resulta insuficiente, más lo será en condiciones de anegamiento radicular parcial. Pero, dado que la contribución relativa de los diferentes estratos a la absorción potásica, nitrogenada y fosforada varía, cabe la posibilidad que en condiciones de anegamiento, se altere la importancia relativa de la escasez de los tres elementos. La pérdida de parte del sistema radicular por inmersión, podría por ejemplo implicar la pérdida de un estrato relativamente más importante en la provisión de fósforo que de potasio, y como consecuencia de ello, se perjudicaría en mayor grado la absorción de fósforo que la de potasio.

El análisis realizado anteriormente para llegar a la expresión general [35], ha supuesto que solo un elemento actúa como factor limitante. Sin embargo, dicho análisis puede ampliarse para asimilar también la situación recién planteada. En efecto, efecto, la ecuación [35], puede aplicarse separadamente para cada elemento deficitario detectado por el análisis foliar. Esto se especificaría simbólicamente así:

$$[35a] \quad \left(\frac{P_z}{P_d} \right)_M = \frac{1 - \left[1 - (Pd/P_x)_M \right] \frac{\int_0^{tc} \int_0^z r \rho Q M dz dt}{\int_0^{tc} \int_0^z r \rho Q dz dt}}{(Pd/P_x)_M}$$

donde M representa un determinado elemento químico esencial que resulta limitante al crecimiento del cultivo (potasio, nitrógeno, fósforo, etc.). El valor que en cada

caso corresponda a $(Pd/Px)_M$ se obtendrá, por ejemplo mediante técnicas adecuadas de diagnóstico foliar. Por otra parte, el exponente de la expresión (35a) incluye ahora la contribución de cada estrato del perfil en elemento **M** considerado. Es la modalidad de la distribución en el perfil de cada elemento **M**, que hace posible que un determinado régimen de fluctuación freática provoque cambios en la importancia relativa de los elementos escasos sobre la producción.

Aplicada la ecuación (35a) a cada elemento escaso, se obtendrán valores diferentes de $(Pz/Pd)_M$. De acuerdo a los principios del "factor mínimo" y de "accesibilidad nutricional" (Norero 1973a) se debe adoptar como valor definitivo de (Pz/Pd) , el menor de ellos. Se pondrá así también de manifiesto, cual elemento resulta más limitante bajo un determinado régimen de fluctuación freática.

A pesar que las consideraciones hechas durante el desarrollo de (35), son simplistas, su aplicación todavía puede resultar complicada al analizar la influencia de la napa freática sobre la productividad de los cultivos con fines generales de planificación y aplicaciones hidrológicas. En estos casos, pueden justificarse ciertas simplificaciones adicionales, que conduzcan a una expresión o evaluación más sencilla del problema. En definitiva, será el grado de concordancia o discrepancia que se encuentre entre las observaciones prácticas o mediciones experimentales y las predicciones derivadas del modelo así simplificado, lo que decidirá si se justifican, al menos técnicamente estas simplificaciones. A continuación se plantean algunas de ellas:

- 1o) — si las raíces y la fertilidad del suelo se distribuyen uniformemente en toda la zona enraizable del perfil;
 — el suelo es homogéneo, y
 — la concentración de raíces y la fertilidad del suelo no cambian sustancialmente por efecto de la inundación de la zona radicular.
 la ecuación (34) se reduce a:

$$(34a) \quad \frac{A}{Ad} = \frac{\int_0^{tc} r \rho Q \int_0^z dz dt}{\int_0^{tc} r \rho Q \int_0^z D dz dt} = \frac{\int_0^{tc} Z dt}{\int_0^{tc} D dt}$$

Luego, la fórmula (35) quedaría simplificada a:

$$(35b) \quad \frac{Pz}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/Px) \int_0^{tc} Z dt}{Pd/Px \int_0^{tc} D dt}$$

La ecuación (35b) expresa los efectos negativos de un nivel freático fluctuante sobre la producción, en función de la fertilidad del suelo, **Pd/Px**, y de la proporción entre la suma total de las fluctuaciones del nivel freático (proporcional a z), y la suma total de las profundidades de penetración radicular durante un determinado lapso de tiempo.

- 2o) si a las simplificaciones anteriores se agrega la de que el nivel freático varía irregularmente en el tiempo con fluctuaciones de poca consideración, la ecuación (33a) se reduce a:

$$(36) \quad \int_0^{tc} Z dt = Ztc$$

- 3o) si en las condiciones enunciadas en el punto (1o), el nivel freático varía regularmente en el tiempo, ascendiendo o descendiendo gradualmente a partir de una profundidad inicial dada, de manera que también la profundidad **Z** de enraizamiento varía paulatinamente, se podría escribir (33a) así:

$$\int_0^{tc} Z dt = \int_0^{tc} [Z_i - (2b) t] dt$$

De donde

$$(37) \quad \int_0^{t_c} Z dt = Z_i t_c \pm b t_c^2$$

En la que:

$$Z_i = W_i \pm a$$

W_i es la profundidad inicial del nivel freático ($t = 0$)

a es la diferencia entre el nivel freático W_i y la profundidad máxima a que enraza el cultivo, Z , en condiciones de anegamiento subterráneo ($a \geq 0$).

$2b$ es la tasa de incremento (-), o descenso (+) del nivel freático durante ($t_c - t_0$).

4o) si en las condiciones del punto (1o), el nivel freático se mantiene invariable en t , se tendrá:

$$(38) \quad \int_0^{t_c} Z dt = Z t_c$$

5o) si en las condiciones del punto (1o) D varía en el tiempo de manera predecible:

α) según una función sigmoïdal, por la cual:

$$D = \frac{D_f}{1 + a \exp(-bt)}$$

siendo: D_f la profundidad final asintótica a la que tiende el cultivo hacia el fin de su ciclo vital; a y b son coeficientes empíricos, se tendrá:

$$(39) \quad \int_0^{t_c} D dt = t_c + \frac{1}{b} \ln \left[\frac{1 + a \exp(-bt_c)}{1 + a} \right]$$

β) según una función logarítmica, por la cual:

$$\frac{D}{D_f} = \left(\frac{t}{t_f} \right)^b$$

donde:

D_f igual que en a) precedente

t_f es el tiempo que debe transcurrir para que el cultivo adquiera la profundización máxima de sus raíces, D_f .

b es un coeficiente empírico

en este caso se obtendrá:

$$(40) \quad \int_0^{t_c} D dt = \frac{D_f t_c^{(b+1)}}{r^b (b+1)}$$

6o) si en las condiciones del punto (1o), D permanece invariable en el tiempo.

$$(41) \quad \int_0^{t_c} D dt = D t_c$$

e) Casos particulares

Las relaciones anteriores pueden combinarse para representar ciertas situaciones reales, como las que se indican a continuación:

- 1o) cultivos perennes y nivel freático a profundidad constante Este es el caso más simple. Aplicando las fórmulas (38) y (41), se obtiene:

$$(34b) \quad \frac{A}{Ad} = \frac{\int_0^{tc} Z dt}{\int_0^{tc} D dt} = \frac{Ztc}{Dtc} = \frac{Z}{D}$$

Luego, la producción relativa será:

$$(35c) \quad \frac{Pz}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/Px) \left(\frac{Z}{D}\right)}{Pd/Px}$$

- 2o) cultivos perennes y nivel freático con fluctuaciones irregulares, pero de poca magnitud, aplicando (36) y (41), se obtiene:

$$(34c) \quad \frac{A}{Ad} = \frac{\int_0^{tc} Z dt}{\int_0^{tc} D dt} = \frac{\bar{Z}tc}{Dtc} = \frac{\bar{Z}}{D}$$

de donde:

$$(35d) \quad \frac{Pz}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/Px) \left(\frac{\bar{Z}}{D}\right)}{Pd/Px}$$

- 3o) cultivos perennes y variaciones regulares del nivel freático durante un lapso de tiempo $\Delta t = tc - to$. Aplicando (37) y (41):

$$(34d) \quad \frac{A}{Ad} = \frac{\int_0^{tc} Z dt}{\int_0^{tc} D dt} = \frac{Zi + \frac{b}{D} tc^2}{Dtc} = \frac{Zi + \frac{b}{D} tc}{D}$$

y la producción relativa será

$$(35e) \quad \frac{Pz}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/Px) \left(\frac{Zi}{D} + \frac{b}{D} tc\right)}{Pd/Px}$$

- 4o) cultivos anuales y nivel freático constante o con fluctuaciones de poca magnitud ($Z = \bar{Z}$)

α) el desarrollo de raíces varía en el lapso Δt según una función sigmoial. Se aplican (39) y (38) o (36).

$$(34e) \quad \frac{A}{Ad} = \frac{Ztc}{tc + \frac{1}{b} \ln \left(\frac{1 + a \exp(-btc)}{1+a} \right)}$$

rearrreglando términos:

$$\frac{A}{Ad} = 1 + \frac{1}{btc} \ln \left[\frac{1 + a \exp(-btc)}{1+a} \right]^{-1} \quad (Z)$$

de donde, la producción será:

$$(35f) \quad \frac{Pz}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/Px) \left\{ 1 + \frac{1}{btc} \ln \left[\frac{1 + a \exp(-btc)}{1+a} \right] \right\}^{-1} Z}{Pd/Px}$$

β) el desarrollo radicular es logarítmico en el lapso $t = t_c - t_0$. Se aplican [40] y [38] o [36]:

$$[34f] \quad \frac{A}{Ad} = \frac{Z t_c}{\frac{Df t_c}{(b+1)}} = (b+1) \frac{Z}{D} \left(\frac{t_f}{t_c}\right)^b$$

y si $t_f = t_c$ se obtendrá:

$$\frac{A}{Ad} = \frac{(b+1) Z}{Df}$$

y finalmente:

$$[35g] \quad \frac{P_z}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/P_x)^{(b+1) \frac{Z}{Df}}}{Pd/P_x}$$

5o) cultivos anuales y nivel freático variando gradualmente durante el lapso Δt

a) el desarrollo de raíces es sigmoïdal. Se aplican [37] y [39]:

$$[34g] \quad \frac{A}{Ad} = \frac{Z i t_c \pm b t c^2}{t_c + 1/b \ln \left[\frac{1 + a \exp(-b t c)}{1 + a} \right]}$$

rearrreglando términos:

$$\frac{A}{Ad} = \frac{Z i \pm b t c}{1 + 1/b t c \ln \left[\frac{1 + a \exp(-b t c)}{1 + a} \right]}$$

y por último:

$$[35h] \quad \frac{P_z}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/P_x) \left\{ 1 + \frac{1}{b t c} \ln \left[\frac{1 + a \exp(-b t c)}{1 + a} \right] \right\}^{-1} (Z i \pm b t c)}{Pd/P_x}$$

β) el desarrollo radicular es logarítmico en el lapso $\Delta t = t_c - t_0$. Se aplican 37 y 40:

$$[34h] \quad \frac{A}{Ad} = \frac{(Z i \pm b t c) t c}{\frac{D f t c}{(b+1)} (b+1) t_f^b}$$

y si $t_f = t_c$,

$$\frac{A}{Ad} = (b+1) \left(\frac{Z i \pm b t c}{D f} \right)$$

y finalmente:

$$[35i] \quad \frac{P_z}{Pd} = \frac{1 - (1 - Pd/P_x)^{(b+1) \left(\frac{Z i \pm b t c}{D f} \right)}}{Pd/P_x}$$

6o) para todos los casos anteriores si el suelo, en condiciones de buen drenaje, es de alta fertilidad y por lo tanto, provee los nutrientes necesarios a la producción máxima, P_x , debe aplicarse la ecuación [28] en vez de [30]. En este caso, A/Ad , se transforma en A/A_x , pero ésta puede ser también reemplazada en [28] por cualquier versión aplicable a la ecuación [34].

El empleo de la ecuación [28] requiere asignar un valor al coeficiente c . Este valor puede deducirse de la siguiente manera:

En la relación [28] el valor de Pz/Px se acerca asintóticamente a 1, a medida que A se aproxima a Ax . Esto impide definir con precisión cual es el valor de Ax al cual se obtendrá la producción máxima, Px . Por otra parte, en la práctica agrícola resulta difícil apreciar, o no tienen mayor significación práctica las variaciones de producción inferiores al 5 o/o. Puede entonces arbitrariamente, definirse Ax como la absorción mineral necesaria para obtener el 96.8 o/o de la producción máxima. Entonces:

$$\frac{P}{Px} = 1 - \exp(-cA/Ax) = 1 - \exp(-c) = 0.968$$

$$\exp(-c) = 1 - 0.968 = 0.032 \text{ y}$$

$$c = 3.44$$

Con estas salvedades, se derivan los siguientes casos particulares, considerando un suelo muy fértil:

α) variaciones irregulares del nivel freático y de enraizamiento

$$[28a] \quad \frac{P}{Px} = 1 - \exp \left[-3.44 \frac{\int_0^{tc} Z dt}{\int_0^{tc} D dt} \right]$$

β) cultivos perennes y nivel freático invariable o con variaciones de poca magnitud.

$$[28b] \quad \frac{P}{Px} = 1 - \exp \left[-3.44 (Z/D) \right]$$

γ) cultivos perennes y cambios graduales de nivel freático:

$$[28c] \quad \frac{P}{Px} = 1 - \exp \left[-3.44 \frac{Z_i \pm}{D} \left(3.44 \frac{b}{D} \right) tc \right]$$

δ) cultivos anuales y nivel freático invariable:

$$[28d] \quad \frac{P}{Px} = 1 - \exp \left[\frac{-3.44Z}{1 \pm \frac{1}{btc} \ln \left[1 + a \exp(-btc)/(1+a) \right]} \right]$$

$$[28e] \quad \frac{P}{Px} = 1 - \exp \left[\frac{-3.44Z (b+1)}{Df} \right]$$

ε) cultivos anuales y nivel freático cambiando gradualmente:

$$[28f] \quad \frac{P}{Px} = 1 - \exp \left[\frac{-3.44 (Z_i \pm btc)}{1 + \frac{1}{btc} \ln \left[1 + a \exp(-btc)/(1+a) \right]} \right]$$

$$[28g] \quad \frac{P}{Px} = 1 - \exp \left[\frac{-3.44 (b+1) (Z_i \pm btc)}{Df} \right]$$

B. VERIFICACION EXPERIMENTAL

Las expresiones que tienen posibilidad de verificarse con experiencias descritas en la literatura son: [35c], [35d], [35f], [35g], [28b], [28d] y [28e]. Ahora bien, si la única variable en los experimentos es el nivel freático, y en consecuencia varía solamente la profundidad útil de enraizamiento, Z , y si se ha registrado el efecto que esa variable tiene en la producción relativa, P/P_x , es posible comprobar la validez del análisis precedente englobando las expresiones [35c], [35d], [35f] y [35g] en una sola. Esto se puede hacer de la siguiente manera:

$$\frac{P}{P_d} = \frac{1 - (1 - P_d/P_x)^{bZ}}{P_d/P_x} = \frac{P_x}{P_d} - \frac{P_x}{P_d} (1 - P_d/P_x)^{bZ}$$

y finalmente:

$$[42] \quad \frac{P}{P_d} = A - AB^{bZ}$$

en la cual: $A = P_x/P_d$ y
 $B = (1 - P_d/P_x)$
 b variará de acuerdo a la relación A/Ad considerada

Lo que normalmente se registra en los experimentos es la profundidad de la napa freática, W , y no la profundidad de enraizamiento útil, Z . Sin embargo, como $Z = W \pm Y$, la expresión [42] puede escribirse así:

$$\frac{P}{P_d} = A - AB^{b(W \pm Y)} = A - (AB^{\pm bY}) B^{bW} \quad y$$

$$[43] \quad \frac{P}{P_d} = A - KB^{bW}$$

en la cual: $K = AB^{\pm bY}$

rearreglando términos:

$$A - P/P_d = KB^{bW}$$

y tomando logaritmos:

$$1n(A - P/P_d) = 1n K + bW \quad 1n B$$

y se obtiene finalmente:

$$[44] \quad 1n(A - P/P_d) = K' + cW$$

en la cual: $K' = 1n K$ y
 $c = b(1n B)$

Por lo tanto, la validez de las expresiones [35c], [35d], [35f] y [35g], pueden comprobarse experimentalmente representando en papel semilogarítmico los valores de $(A - P/P_d)$ versus los de W . La utilidad de dichas expresiones será tanto mayor cuando más recta sea la disposición de estos valores en el papel semilogarítmico.

También las expresiones [28b], [28d], y [28e], pueden reducirse a una sola:

$$P/P_x = 1 - e^{-bZ} = 1 - e^{-b(W \pm Y)} = 1 - e^{-bW \pm bY}$$

$$[45] \quad P/P_x = 1 - (e^{\pm bY}) e^{-bW}$$

$$P/P_x = 1 - ce^{-bW}$$

en la cual: $c = e^{\pm bY}$
b variará de acuerdo a la expresión particular considerada.

reordenando términos:

$$1 - P/P_x = ce^{-bW}$$

y tomando logaritmos, se obtiene finalmente:

$$(46) \quad \ln(1 - P/P_x) = \ln c \pm bW$$

Por lo tanto, la validez de las expresiones (28b), (28d) y (28e), se puede probar representando en papel semilogarítmico los valores de $(1 - P/P_x)$ y de W . Si (46) describe bien la relación entre ambos, debe obtenerse una línea recta.

La ecuación (46) no es sino un caso particular de la (44) en la que A vale 1. Este caso representa la situación particular de un suelo muy fértil.

Se describen en la literatura experiencias realizadas por diversos autores en distintos cultivos, localidades y temporadas (Hooghoudt, 1952; Van Horn, 1958; Harris, 1962; Hoogerkamp y Woldring, 1967) que aportan datos de producción relativa, P/P_x , y profundidad de la napa freática, W , útiles para las comprobaciones sugeridas arriba. Esta información se ha recopilado en el cuadro No. 1. La representación semilogarítmica, según (46), aparece en las figuras 4 y 5. Como puede constatarse, la disposición de los valores experimentales para distintos cultivos y localidades puede describirse convenientemente por rectas.

Lo que reviste interés fundamental en este estudio, es tratar de establecer una relación única entre la productividad vegetal y los niveles freáticos. En las figuras 4 y 5 se observa que si bien se obtuvieron relaciones lineales en apoyo a la fórmula (44).

Cuadro 1: Datos sobre la influencia de niveles freáticos en la productividad de diversos cultivos en distintos suelos y localidades.

C U L T I V O	Productividad relativa (P/P _x)							
	nivel freático (W) (cm) =							
	40	60	80	90	100	120	140	150
Trigo <u>1/</u>	59	76		86		93		100
Cebada <u>1/</u>	57	78		86		94		100
Avena <u>1/</u>	55	78		87		98		100
Frijoles <u>1/</u>	83	90		96		98		100
Colza <u>1/</u>	74	89		93		97		100
Remolacha <u>1/</u>	71	84		92		97		100
Trigo de invierno <u>2/</u>	52	67	77		89			100
Papa <u>2/</u>	65	82	95		100			
Pastos <u>3/</u>	56	79		91			100	

1/ Van Horn, J. W. (1958);

2/ Hooghoudt, S. B. (1952);

3/ Hoogerkamp, M. y J. J. Waldring (1967)

FIGURA 4

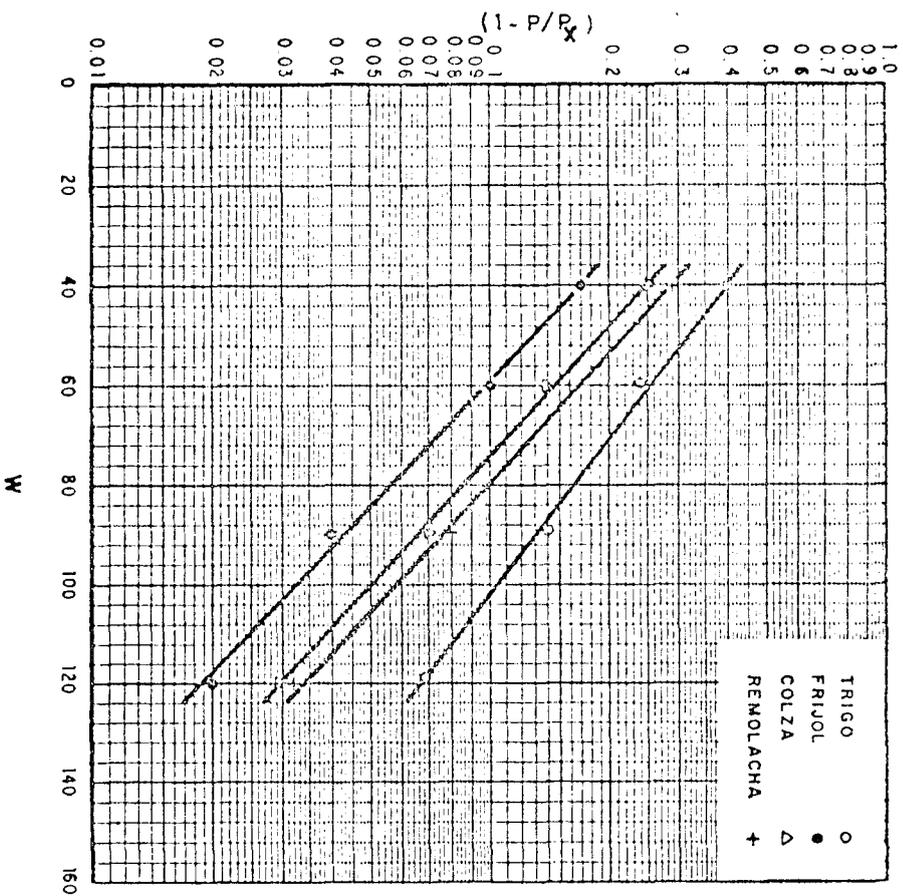
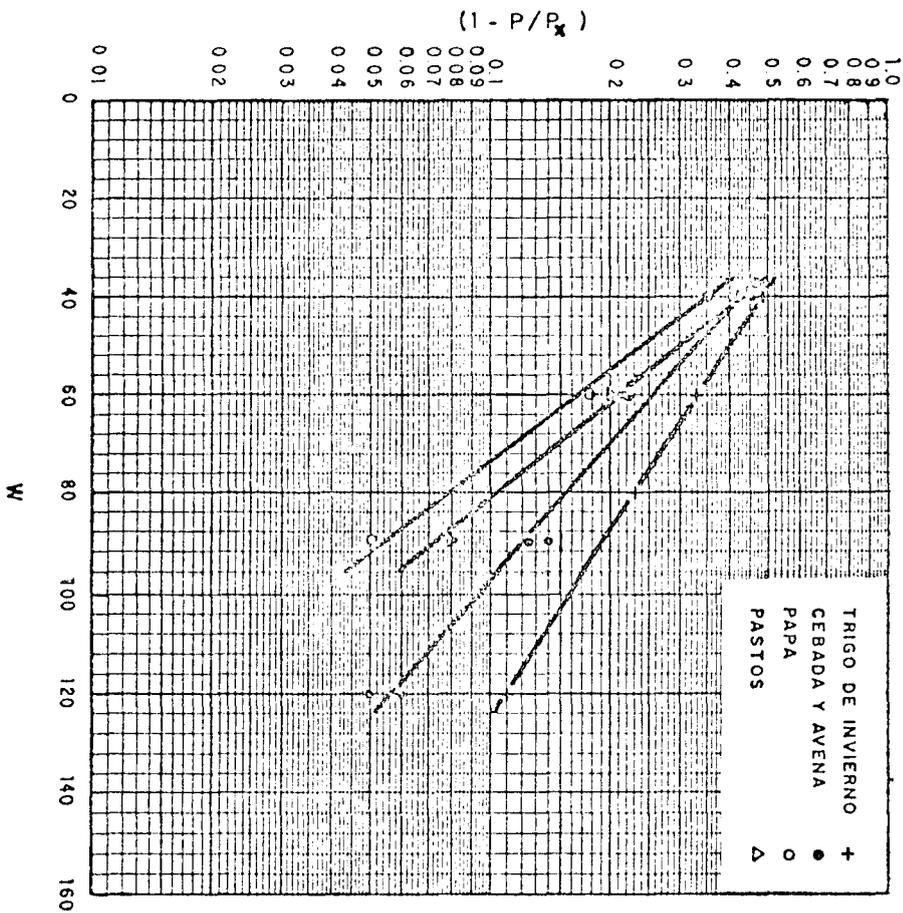


FIGURA 5



Ajuste de datos experimentales de producción de diversos cultivos en función del nivel freático, de acuerdo a la fórmula 44

el valor de las constantes **A**, **K** y **c** varía para los diferentes cultivos y localidades. Interesa ahora elaborar una fórmula que reúna todos estos datos en una sola relación de validez general. Para ello, se puede razonar de la siguiente manera:

$$P/P_x = 1 - e^{-b(W \pm Y)} = 1 - e^{-bW_x \left(\frac{W \pm Y}{W_x}\right)}$$

$$P/P_x = 1 - e^{-b' \left(\frac{W}{W_x} \pm \frac{Y}{W_x}\right)}$$

arreglando términos y tomando logaritmos:

$$(47) \quad \ln(1 - P/P_x) = -b' \left(\frac{W}{W_x} \pm \frac{Y}{W_x}\right)$$

y, finalmente separando las constantes:

$$(47a) \quad \ln(1 - P/P_x) = A - b' \left(\frac{W}{W_x}\right)$$

en la cual:

$$A = \pm \frac{b' Y}{W_x}$$

Para investigar la validez general de esta expresión, se dedujo previamente el valor de **W_x** de las figuras 4 y 5. Se adoptó como **W_x** el valor de **W** en el cual se obtuvo una productividad relativa, $P/P_x = 0.968$. Esta última equivale a cinco "unidades Baule" en la relación de Mitscherlich, que como se recordará constituye la base de la expresión (44).

A este objeto, se calcularon los valores de **P/P_x** correspondientes a **W/W_x**, a partir de los datos consignados en el cuadro 1. Los resultados de estos cálculos se presentan en el cuadro 2, y en la forma semi-logarítmica, indicada por (47), en la figura 6. El hecho de que los puntos experimentales, correspondientes a diversos cultivos y localidades, se dispongan con bastante aproximación alrededor de una línea recta, confiere validez a la fórmula (47), como expresión general para describir la influencia negativa de una napa freática sobre la producción.

Más aún, si la expresión (47) es correcta, el coeficiente de regresión de la relación indicada en la figura 6 debe tener un valor aproximadamente igual a 3.44. En efecto, la ecuación (47) tiene que satisfacer también la situación particular en que $Y = 0$ (es decir, las raíces permanecen activas hasta el plano mismo del nivel freático), en cuyo caso se tiene:

$$(47b) \quad \ln(1 - P/P_x) = -b' (W/W_x)$$

Además, como se ha escogido **W_x** como la profundidad de la napa freática, **W**, en la cual la producción relativa, **P/P_x**, es igual a 0.968, usando (47b) para describir la situación en que $W = W_x$:

$$(47c) \quad \begin{aligned} \ln(1 - 0.968) &= -b' (1) \\ \ln(0.032) &= -b' \\ -3.44 &= -b' \end{aligned}$$

Para comprobar si efectivamente el valor de la pendiente de la relación ilustrada en la figura 6, se aproxima al valor teórico de 3.44, y al mismo tiempo medir el grado de ajuste de los datos experimentales a la relación teórica, se hizo un análisis de correlación según el procedimiento de mínimos cuadrados anexado en el apéndice. Este análisis indicó que el valor estimado de b' resultó ser igual a 3.33.

Además, se hizo un test de hipótesis para comprobar la identidad del valor "estimado" (3.33) con el valor "teórico" (3.44), el cual reveló que no existía diferencia significativa entre ambos valores (anexo 5, apéndice). Por otra parte, el coeficiente de correlación alcanzó un valor igual a 0.954.

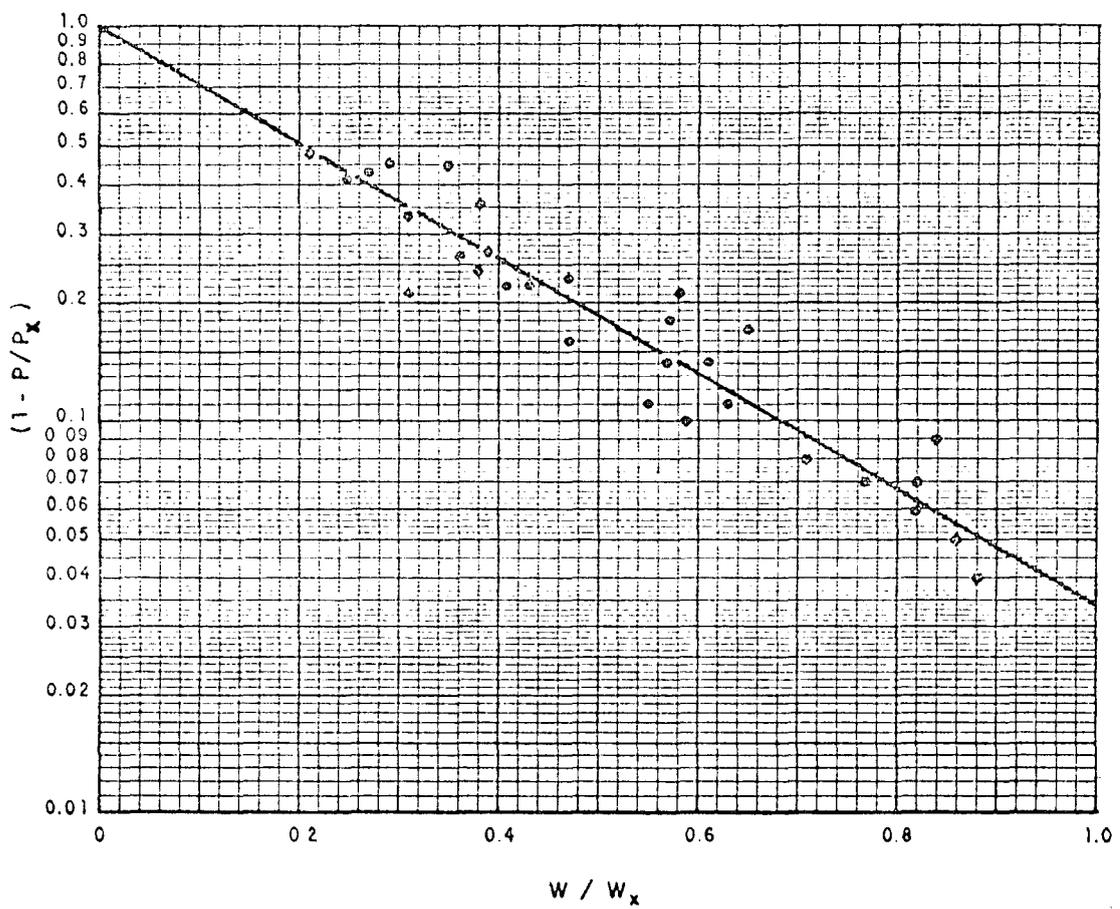
En síntesis, estas comprobaciones experimentales indican que el modelo agrofísico desarrollado, puede emplearse para describir la influencia que ejerce una napa freática sobre la producción de los cultivos.

CUADRO 2.

Productividad relativa en función de la profundidad relativa del nivel freático.

CULTIVO	Wx	W/Wx	P/Px
Trigo	157	0.25	0.59
		0.38	0.76
		0.57	0.86
		0.77	0.93
Cebada	147	0.27	0.57
		0.41	0.78
		0.61	0.86
		0.82	0.94
Frejol	139	0.29	0.55
		0.43	0.78
		0.65	0.83
		0.88	0.96
Colza	110	0.39	0.83
		0.59	0.90
		0.88	0.96
Remolacha Azúcar	110	0.36	0.74
		0.55	0.89
		0.82	0.93
Trigo de invierno	190	0.31	0.79
		0.47	0.84
		0.71	0.92
Papa	105	0.21	0.52
		0.31	0.67
		0.47	0.77
		0.63	0.89
Pasto	113	0.38	0.65
		0.57	0.82
		0.86	0.95
Pasto	113	0.35	0.56
		0.58	0.79
		0.84	0.91

FIGURA 6



Ajuste de datos experimentales de producción de diversos cultivos en función del nivel freático, de acuerdo a la fórmula 47 a

C. APLICACION AL SISTEMA HIDROLOGICO BOCONÓ-MASPARRO

Las expresiones obtenidas han sido aplicadas al sistema hidrológico Boconó-Masparro con el objeto de cuantificar el efecto del nivel freático sobre la producción de cultivos típicos de la zona y evaluar el problema de drenaje.

1. DATOS E INFORMACION

a) Suelos

1.- Perfil y texturas. Del Estudio agrológico detallado del sistema Boconó-Masparro (Holmes, 1.968), se escogieron tres series de suelo:

Serie ~~M~~ ^{Man}ndez tipo arcilloso y arcilloso limoso.

Serie ~~F~~ ^{Fa}nfurria, tipo franco y franco fase drenaje lento.

Serie Boconó, tipo areno francoso y franco arenoso.

De la descripción de los perfiles correspondientes se ha determinado que no existe impedimento mecánico para el desarrollo radicular en ninguno de los suelos estudiados.

2.) Curvas de retención de humedad. Estas fueron obtenidas del análisis de las características de retención de humedad en algunos suelos de los llanos occidentales, (Guilarte y Abreu, 1.972), y están presentadas en la figura A.2.O. del Apéndice.

b) Cultivos.

Se han escogido tres cultivos típicos de la región: maíz, caraota y algodón.

1.) Epoca de siembra. Ha sido determinada de acuerdo a lo indicado en el "Proyecto de desarrollo agrícola de la zona de Boconó-Masparro", realizado por CIDIAT-ULA y Corpoandes (1.972).

2) Desarrollo radicular. Se obtuvieron datos experimentales de estudios realizados por el M.O.P. (Abreu, 1.966 ; Alvarez, 1.971).

Los datos experimentales demostraron que el desarrollo radicular de los cultivos estudiados, se ajusta a una función logarítmica, como se indica en la figura A.2.4. del apéndice, de la forma:

$$\left[48 \right] \quad \frac{D}{D_f} = \left(\frac{t}{t_f} \right)^b$$

Y se determinó los siguientes valores del exponente **b**:

$$\begin{aligned} \text{para maíz} &= 1.30 \\ \text{para caraota} &= 1.20 \\ \text{para algodón} &= 1.15 \end{aligned}$$

c) Clima y demanda evapotranspiratoria.

1.) Precipitación y evaporación. Se tomaron los valores correspondientes a la estación "La Marqueseña Hda." para el año 1.970. Los mismos que se indican en el cuadro A.2 O del apéndice.

2.) Evaporación máxima. Para determinar los valores mensuales de evaporación máxima, se utilizó las siguientes relaciones ^{1/}:

$$\left[49 \right] \quad E_x = E_o \left[0.3 + 0.6 \left(F/F_x \right) \right]$$

$$\left[50 \right] \quad \frac{F}{F_x} = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{4t}{t_c} - 2 \right) + \frac{1}{2}$$

¹ Aldo Norero entrevista personal.

en las que:

Ex es la evaporación máxima en mm./día

Eo es la evaporación de tina en mm./día

t/tc es la relación entre el tiempo de desarrollo a partir de la siembra y el tiempo final requerido hasta la cosecha.

F/Fx es la relación entre el índice foliar existente y el máximo.

d) Hidrología.

Las fluctuaciones de la napa freática durante el año 1.970, fueron obtenidas de los registros de la red de pozos de observación del sistema de riego Boconó, escogiéndose pozos situados en cada una de las series de suelo antes indicadas. Estas fluctuaciones se presentan en las figuras A.2.1., A.2.2., y A.2.3., del Apéndice.

2. PROCEDIMIENTO

Se ha requerido la siguiente secuencia:

- a) Se dividió el ciclo de desarrollo del cultivo en períodos mensuales
- b) Se representó gráficamente las fluctuaciones del nivel freático y se obtuvo la profundidad promedio durante cada período.
- c) Se determinó los valores mensuales de evaporación máxima, **Ex**, según [49] y [50]
- d) Se calculó y graficó el desarrollo radicular del cultivo según [48]
- e) Se determinó el valor del umbral óptimo de riego, empleando las figuras A.1.4, A.1.5, A.1.6. del Apéndice.
- f) Se calculó la profundidad del nivel freático necesaria para garantizar una intensidad de ascenso capilar igual a la demanda, **Wx**, empleando las figuras A.1.1., A.1.2. y A.1.3. del Apéndice.
- g) Se calculó la profundidad de la napa freática, en presencia de cultivo, para que el flujo ascendente sea igual la demanda, según [22].
- h) Se determinó si la influencia del nivel freático es positiva o negativa, considerando que la satisfacción de la demanda evaporadora se restringe únicamente al aporte freático.
- i) Si el **efecto es negativo**, la profundidad real del nivel freático, **W**, restringe la zona de desarrollo radicular activo. En este caso:
 - 1) Se determinó la altura de la zona de subaeración, utilizando la figura A.1.8 del Apéndice.
 - 2) Se calculó la profundidad de enraizamiento activo, según $Z = W \pm Y$
 - 3) Se calculó la producción obtenida en estas condiciones, considerando suelo fértil o infértil, según [28] y [35b], respectivamente.
- j) Si el **efecto es positivo**, el aporte freático es insuficiente para satisfacer la demanda evaporadora, en este caso y para cada período:
 - 1) Se efectuó un balance hídrico del suelo, considerando todos los aportes, con excepción del riego, según:

$$[51] \quad \sum E = \sum F + p + s$$

en la cual:

F es el aporte freático total durante el período considerado.

p es la precipitación total durante el período

s es el aporte total de la humedad del suelo en ese lapso.

E es la evaporación real total durante el periodo.

A su vez,

$$(52) \quad s = \bar{D} (h_i - h_f)$$

En la que:

\bar{D} es la profundidad promedio de desarrollo radicular en el período
 h_i es el contenido volumétrico de humedad a inicios del período
 h_f es el contenido volumétrico de humedad al finalizar el período.

En el caso particular en que la napa freática supla la diferencia entre la demanda evaporadora máxima para el período, $\sum Ex$, y los demás aportes, $s+p$, mediante un aporte total, $\sum Fx$, la ecuación (51) queda así

$$(51 a) \quad \sum Ex = \sum Fx + p + s$$

en el cual, $\sum Fx$, sería el aporte freático requerido para el periodo considerado.

Se consideró que el suelo se encontraría a capacidad de campo al iniciarse el periodo, lo cual es común en cultivos bajo riego, o cuando se siembra a inicios de la época lluviosa en cultivos de secano. En estas condiciones para satisfacer la demanda evaporadora del período, es necesario que la humedad del suelo se mantenga a un valor igual o superior a h_{mx} . Según este umbral "inicial de marchitamiento" y la ecuación (52) la máxima cantidad de agua que puede ceder el suelo para asegurar la transpiración máxima es:

$$(52 a) \quad s_x = \bar{D} (h_{cc} - h_{mx})$$

2) Al realizar el balance hídrico podían preverse las siguientes situaciones

α) si $(p+s) \geq Ex$, se satisface la demanda evaporadora sin requerir para ello el aporte freático. Es decir, **no importaría la profundidad del nivel freático.**

β) Si por el contrario, $(p+s) < Ex$, puede ocurrir que se asegure o no la evaporación máxima, lo cual **dependería de la profundidad del nivel freático.**

En estas condiciones, para que se satisfaga $\sum Ex$, debía obtenerse un aporte igual a $\sum Fx$.

Como se requiere una succión (S), igual o inferior a la succión crítica, S_{mx} , para asegurar Ex , también $\sum Fx$ debía procurarse con una tensión igual o inferior a S_{mx} . En otras palabras, la humedad final del período no debía ser inferior a h_{mx} . Por lo tanto, para satisfacer $\sum Ex$, el valor de s no podría exceder al de s_x calculado por (52 a)

El flujo freático que asegure la evaporación máxima, $\sum Ex$, estaría dado por:

$$(53) \quad \sum Fx = \sum Ex - (p+s)$$

y la intensidad de ascenso freático requerido para el período debería ser:

$$[54] \quad F_x = \frac{\sum F_x}{N}$$

en la que N , es el número de días del período

Lo que debía averiguarse a continuación era si en condiciones particulares de profundidad de nivel freático, W , textura del suelo, n , y evaporación máxima, E_x , se cumplía un flujo capilar ascendente, F , igual al requerido, F_x .

- 1) Si al entrar en las figuras A.1.1, A.1.2. o A.1.3, con W y S_{m_x} , resultaba que $F \geq F_x$, el aporte freático sería suficiente para satisfacer el déficit hídrico del suelo.
- 2) Si F era aproximadamente igual a cero, no existiría aporte freático. Se consideró arbitrariamente que un flujo de 0.5 mm/día era despreciable como aporte freático. De las figuras A.1.1, A.1.2 y A.1.3, se obtuvo entonces la profundidad a la cual cesaba prácticamente la contribución del agua subterránea. Esto ocurre a una distancia medida desde la base del sistema radicular, igual a:

170 cm. en suelos arcillosos

135 cm. en suelos francos y

105 cm. en suelos arenosos.

Si se obtenía esta situación, entonces:

$$[51 b] \quad \sum E = p + s$$

- 3) Si al entrar en las figuras A.1.1, A.1.2 o A.1.3, con W y S_{m_x} , se observaba que $F_x > F > 0$, existía aporte freático pero insuficiente para satisfacer el déficit hídrico del cultivo, y por consiguiente la evaporación real E , sería inferior a la potencial, E_x . En este caso debía calcularse una intensidad de flujo, F , correspondiente a una succión hídrica promedio en la zona de enraizamiento que cumpliera simultáneamente las siguientes condiciones:

- que permitiera el flujo capilar ascendente F ;
- que satisficiera la evaporación relativa, E/E_x . De modo que S_1 , correspondiente a F , sea igual a S_2 , correspondiente a E/E_x .

Esto se consiguió por iteración o tanteo en la secuencia siguiente:

- se eligió arbitrariamente un flujo F ($F < F_x$) que fuera límite a la profundidad W del nivel freático, y se obtuvo la succión aproximada, S_1 , a la cual comenzaba la estabilización asintótica de W para ese flujo.
- introduciendo F en el balance hídrico se calculó E , mediante la fórmula [51], y luego, la razón E/E_x . A su vez de la relación evaporación relativa-succión, presentada en la figura A.1.7, se estimó la succión hídrica S_2 , que correspondía a E y que debería ser igual a S_1 , calculado anteriormente.

Si resultaba que S_2 era igual a S_1 (o mayor que S_1), el flujo

que en realidad ascendía desde la napa freática era **F1** y la evaporación relativa para el período era $E1/Ex$.

Sí por el contrario $S2 < S1$, se eligió un nuevo flujo, **F2**, correspondiente a la succión **S2** calculada.

- Con **F2** se calculó $E2/Ex$, y de la figura A.1.7, un nuevo valor **S3**, que debería ser igual a **S2**. Las operaciones se repitieron hasta obtener la identidad. El valor de la succión que lograba la identidad, era el que aseguraba que se cumplieran al mismo tiempo el balance hídrico y la relación de la figura A.1.7.
- Con esta tensión hídrica promedio se dedujo el valor promedio de E/Ex del período
- De la relación entre **S** y **h**, se dedujo también la humedad promedio del período **h**,

- 3) Conocido \bar{h} , se calculó el contenido final de humedad del período mediante.

$$\boxed{55} \quad h_f = 2\bar{h} - h_i$$

A su vez, **hf** fue considerada como la humedad inicial para el período siguiente.

- 4) Se aplicó el mismo análisis indicado a todos los períodos, determinando de esta manera la evaporación relativa, E/Ex , de cada uno de ellos.
- 5) Se calculó la evaporación relativa promedio, E/Ex , durante todo el ciclo de desarrollo del cultivo.
- 6) Se determinó la producción relativa según $\boxed{23}$.

En síntesis en el cuadro 3 se resume las condiciones que podían presentarse.

Cuadro 3 : Condiciones que pueden presentarse al analizar la influencia del nivel freático sobre la producción de los cultivos.

CONDICION	CARACTERISTICA
I	Efecto Negativo
II	Efecto Positivo : $(p+s) \geq \sum Ex$
III	Efecto Positivo : $(p+s) < \sum Ex$ y $F = Fx$
IV	Efecto Positivo : $(p+s) < \sum Ex$ y $F = 0$
V	Efecto Positivo : $(p+s) < \sum Ex$ y $Fx > F > 0$

IV RESULTADOS

Siguiendo el procedimiento indicado y aplicando las fórmulas elaboradas en el Capítulo anterior, a tres cultivos en algunas situaciones ilustrativas del nivel freático en el Sistema Bocono -Masparro, se obtuvieron los resultados que se tabulan a continuación. Los datos empleados en cada caso y los cálculos que condujeron a estos resultados se detallan y explican en los anexos 2 y 3 del Apéndice.

CASO 1

Cultivo : maíz

Serie : Méndez

Textura: arcilloso

Pozo: F 10

Cuadro 4 : Datos y Cálculos Caso 1

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>		<u>8/</u>	<u>9/</u>	<u>10/</u>
Mes	E ₀	E _x	D	W	S _m x	^s W _x	^c W _x	efecto	Y	Z	cond
Jun	4.4	1.5	28	70	3.5	105	133	—	38	28	
Jul	4.2	2.5	102	25	4.1	80	182	—	34	0	
Ago	4.5	3.8	150	20	3.6	63	213	—	29	0	
Set	5.3	4.8	150	23	3.0	55	205	—	27	0	

La representación gráfica se presenta en la figura 7.

$$\frac{A}{Ad} = \frac{28}{430} = 0.07 \quad \text{Según } \boxed{34 \text{ a}}$$

Cálculo de la producción relativa

- a) Si el nivel de fertilidad es óptimo (Pd/Px = 1)

$$\frac{P}{Px} = 0.21 \quad \text{Según } \boxed{28 \text{ a}}$$

- b) Considerando diferentes niveles de fertilidad; según $\boxed{35 \text{ b}}$:

- alta fertilidad del suelo, Pd/Px = 0.9 , Pz/Pd = 0.17
- moderada fertilidad del suelo, Pd/Px = 0.7 , Pz/Pd = 0.12
- baja fertilidad del suelo, Pd/Px = 0.5 , Pz/Pd = 0.09

* Cálculo indicado en el anexo tres del Apéndice

CASO 2

Cultivo: caraota
 Serie: Méndez
 Textura: arcilloso
 Pozo: F 10

Cuadro 5 : Datos y Cálculos Caso 2

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>	
Mes	Eo	Ex	D	W	Smx	^s Wx	^o Wx	efecto
Nov	4.9	2.0	16	118	2.5	87	103	+
Dic	5.4	4.3	50	168	2.2	60	110	+
Ene	6.5	6.1	60	206	1.6	49	109	+

La representación gráfica se adjunta a la figura 7.

CUADRO 6 : Datos y cálculos Caso 2.

	<u>11/</u>	<u>12/</u>	<u>13/</u>	<u>14/</u>	<u>15/</u>	<u>16/</u>		<u>17/</u>	<u>18/</u>	<u>19/</u>	<u>20/</u>
Mes	p	Ex	hcc	hmx	s	s + p	efecto	Fx	Fx	^s W	F
Nov	54	60	0.46	0.33	21	75	0				
Dic	76	133	0.46	0.34	60	136	0				
Ene	37	189	0.46	0.35	66	103	+	86	2.8	146	0.7

<u>21/</u>	<u>22/</u>	<u>10/</u>
E	E/Ex	cond.
60	1	II
133	1	II
125	0.66	V *
	2.66	

$$E/Ex = 2.66/3 = 0.88$$

$$P/Px = 0.91 \quad \text{según } \boxed{23}$$

* calculo indicado en el anexo 3 del Apéndice

CASO 3

Cultivo: algodón

Serie: Méndez

Textura: arcilloso

Pozo: F 10

Cuadro 7: Datos y cálculos Caso 3.

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>		<u>8/</u>	<u>9/</u>	<u>10/</u>
Mes	Eo	Ex	D	W	Smx	^s Wx	^c Wx	efecto	Y	Z	cond.
Jul	4.2	1.34	10	25	2.5	113	123	—	38	0	I
Ago	4.5	1.84	38	20	3.5	95	133	—	36	0	I
Set	5.3	3.20	70	23	3.2	70	140	—	32	0	I
Oct	4.8	3.80	102	40	3.1	63	165	—	29	11	I
Nov	4.9	4.30	120	118	3.0	60	180	—	28	90	I
Dic	5.4	4.90	120	168	2.6	55	175	0	27	120	I

460

221

La representación gráfica se adjunta en la figura 8.

$$A/Ad = 221/460 = 0.48 \quad \text{según } \boxed{34 \text{ a}}$$

a) Si el nivel de fertilidad es óptimo :

$$P/Px = 0.81 \quad \text{según } \boxed{28 \text{ a}}$$

b) Considerando diferentes niveles de fertilidad, según $\boxed{35 \text{ b}}$:

— para $Pd/Px = 0.9$, — $P/Pd = 0.74$

— para $Pd/Px = 0.7$, — $P/Pd = 0.63$

— para $Pd/Px = 0.5$, — $P/Pd = 0.57$

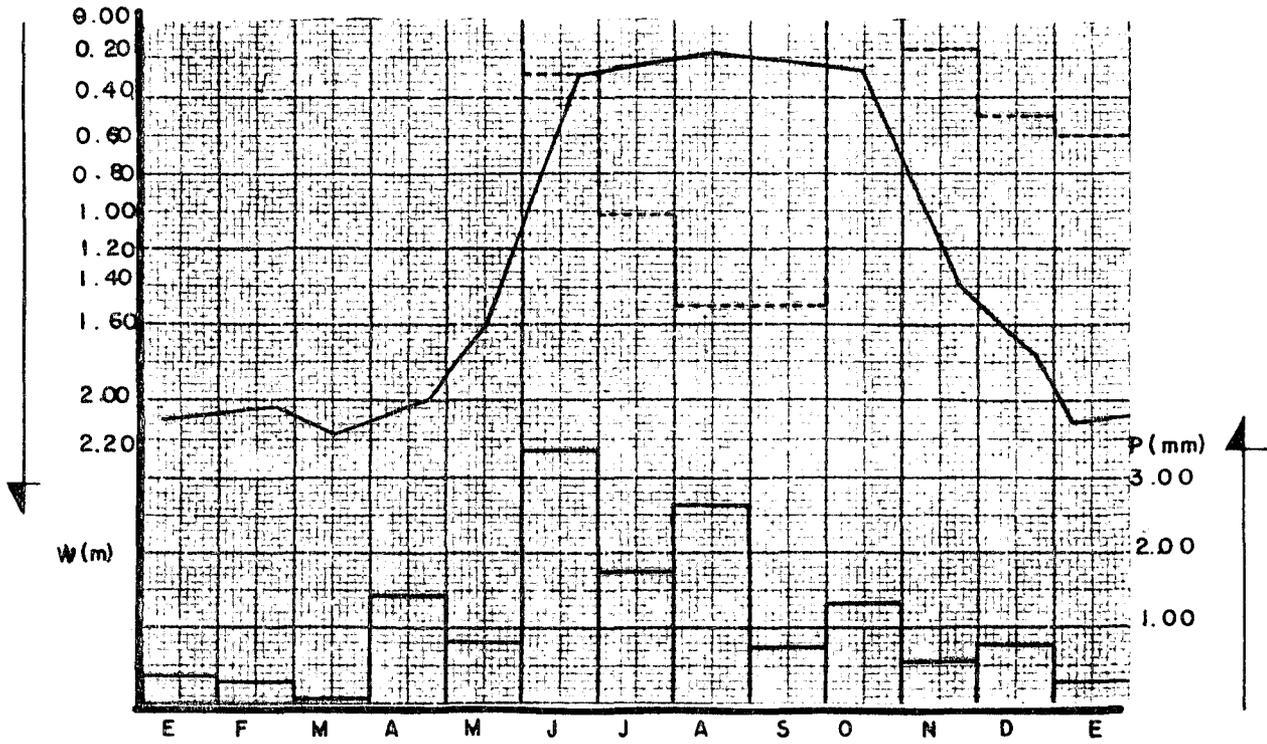


FIGURA 7

Representación Grafica Casos 1 y 2

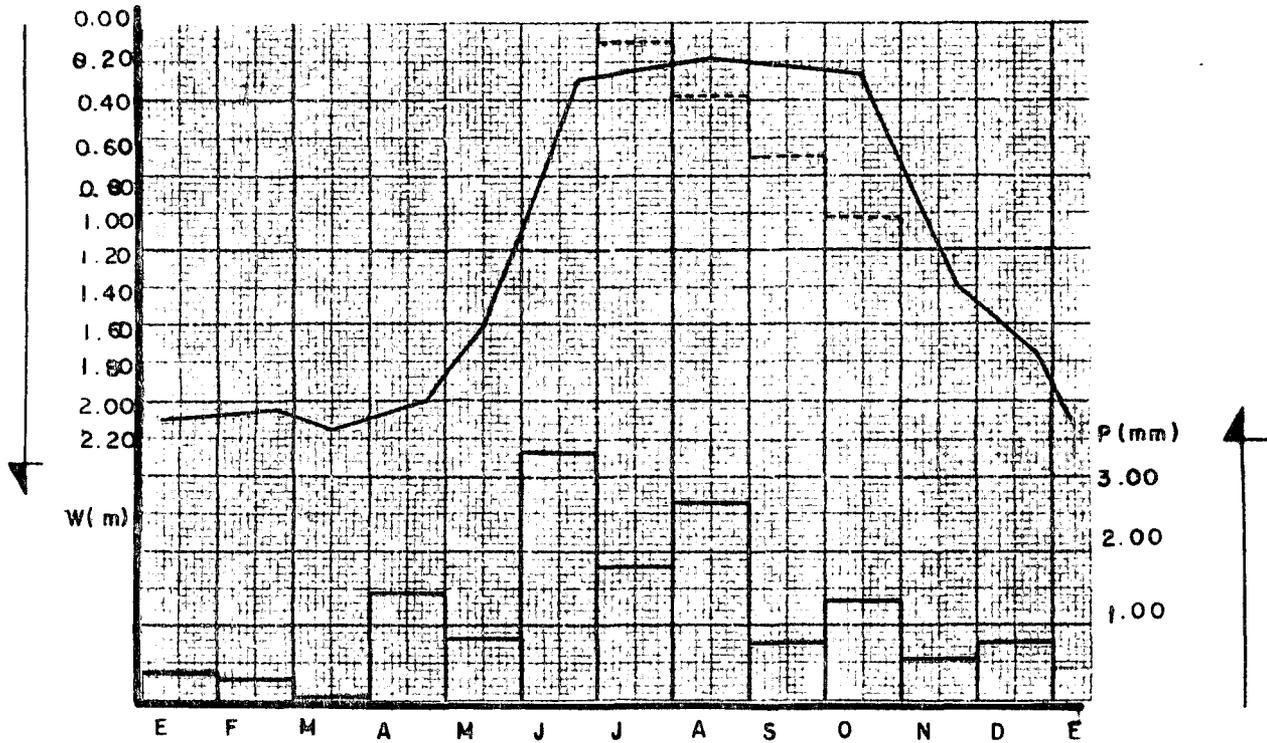


FIGURA 8

Representación Grafica Caso 3

CASO 4

Cultivo: maíz
Serie: Fanfurria
Textura: franco
Pozo: 18+ 400

Cuadro 8 : Datos y cálculos Caso 4.

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>		<u>8/</u>	<u>9/</u>	<u>10/</u>
Mes	Eo	Ex	D	W	Smx	^s Wx	^c Wx	efecto	Y	Z	cond.
Jun	4.4	1.5	28	80	2.5	94	122	—	14	28	
Jul	4.2	2.5	102	50	2.9	79	181	—	14	36	
Ago	4.5	3.8	150	56	2.6	67	217	—	14	42	
Set	5.3	4.8	150	62	2.3	62	212	—	14	48	

430

154

La representación gráfica se adjunta a la figura 9.

$$A/Ad = 154/430 = 0.36$$

a) Si el nivel de fertilidad es óptimo :

$$P/Px = 0.71 \quad \text{según } [34a]$$

b) Considerando diferentes niveles de fertilidad, según [35b] :

— para $Pd/Px = 0.9$, $P/Pd = 0.63$

— para $Pd/Px = 0.7$, $P/Pd = 0.50$

— para $Pd/Px = 0.5$, $P/Pd = 0.44$

CASO 5

Cultivo: caraota
Serie: fanfurria
Textura: franco
Pozo: 18+ 400

Cuadro 9 : Datos y cálculos Caso 5.

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>		<u>8/</u>
Mes	Eo	Ex	D	W	Sma	^s Wx	^c Wx	efecto	Y
Nov	4.9	2.0	16	90	1.7	84	100	+	14
Dic	5.4	4.3	50	88	1.7	65	115	+	14
Ene	6.5	6.1	60	72	1.4	58	118	+	14

La representación gráfica se adjunta en la figura 9.

CUADRO 10 : Datos y cálculos Caso 5.

	<u>11/</u>	<u>12/</u>	<u>13/</u>	<u>14/</u>	<u>15/</u>	<u>16/</u>		<u>17/</u>	<u>18/</u>	<u>19/</u>	<u>20/</u>
Mes	p	Ex	hcc	hmx	s	s+ p	efecto	Fx	Fx	^s W	F
Nov	54	60	0.40	0.28	20	74	0				-
Dic	76	133	0.40	0.28	63	139	0				
Ene	37	189	0.40	0.29	69	106	+	83	2.7	12	2.7

<u>21/</u>	<u>22/</u>	<u>10/</u>
E	E/Ex	cond.
60	1	II
133	1	II
189	1	III

*

$$E/Ex = 3/3 = 1.0$$

$$P/Px = 1.0 \quad \text{según } \boxed{23.}$$

* cálculo indicado en el anexo 3 del Apéndice.

CASO 6

Cultivo: algodón
 Serie: Fanfurria
 Textura: franco
 Pozo: 18 + 400

Cuadro 11. Datos y cálculos Caso 6.

	1/	2/	3/	4/	5/	6/	7/		8/	9/	10/
Mes	Eo	Ex	D	W	Smx	^s Wx	^c Wx	efecto	Y	Z	cond.
Jun	4.5	1.3	10	50	1.8	99	109	—	14	10	I
Ago	4.5	1.8	38	56	2.5	87	125	—	14	38	I
Set	5.3	3.2	70	62	2.3	72	142	—	14	48	I
Oct	4.8	3.8	102	64	2.3	67	169	—	14	50	I
Nov	4.9	4.3	120	90	2.3	65	185	—	14	76	I
Dic	5.4	4.9	120	88	2.0	62	182	—	14	74	I

La representación gráfica se adjunta en la figura 10.

$$A/Ad = 296/460 = 0.64 \quad \text{según } \boxed{34a}$$

a) Si el nivel de fertilidad es óptimo:

$$P/Px = 0.89 \quad \text{según } \boxed{28a}$$

b) Considerando diferentes niveles de fertilidad, según $\boxed{35b}$

— para $Pd/Px = 0.9$, $P/Pd = 0.86$

— para $Pd/Px = 0.7$, $P/Pd = 0.77$

— para $Pd/Px = 0.5$, $P/Pd = 0.72$

CASO 7

Cultivo: maíz
 Serie: Boconó
 Textura: arenoso
 Pozo: G8.

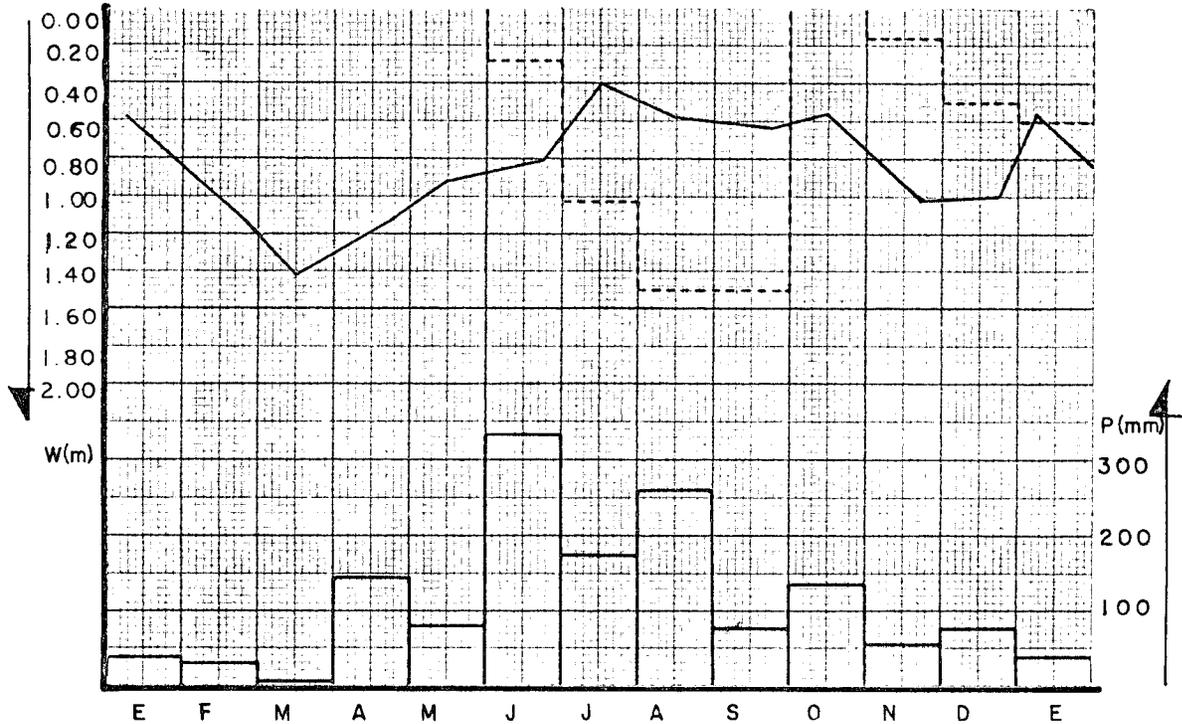


FIGURA 9

Representación Grafica Casos 4 y 5

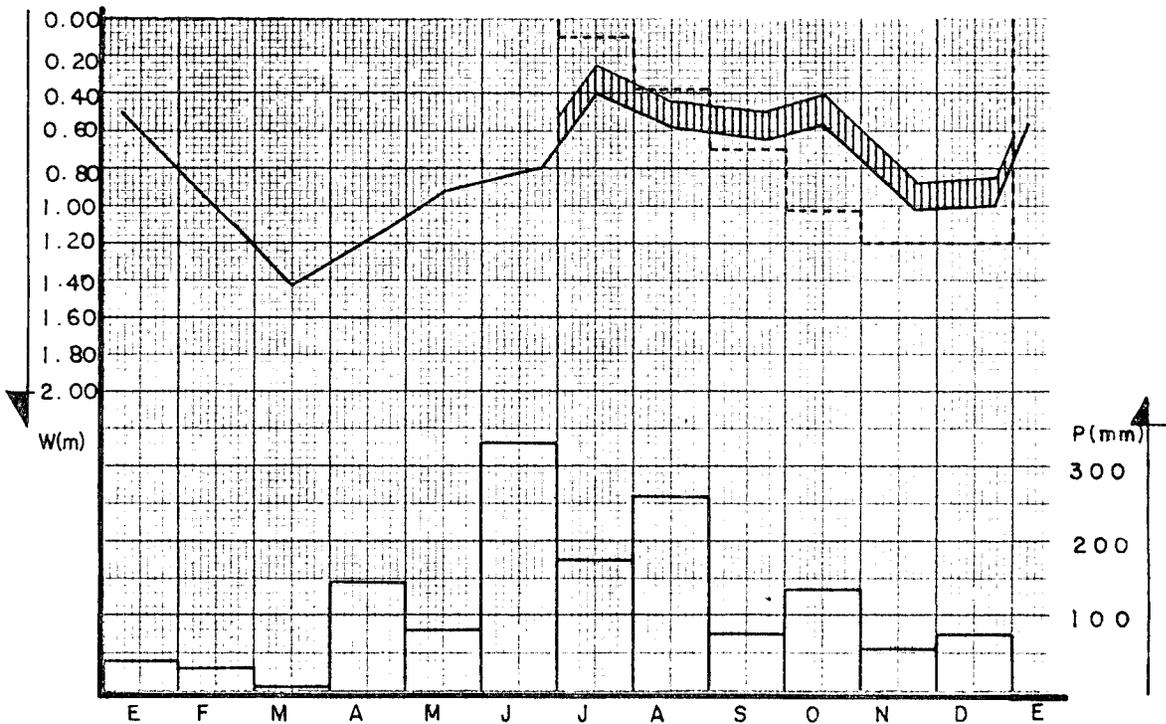


FIGURA 10

Representación Grafica Caso 6

Cuadro 12 : Datos y cálculos Caso 7.

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>		<u>8/</u>	<u>9/</u>	<u>11/</u>	<u>12/</u>		<u>10/</u>
Mes	Eo	Ex	D	W	Smx	^s Wx	^o Wx	efecto	Y	Z	p	Ex	eft.	cond.
Jun	4.4	1.5	28	170	2.1	80	108	+	4	28	333	46	0	II
Jul	4.2	2.5	102	140	2.3	70	172	-	4	102				I
Ago	4.5	3.8	150	124	2.2	62	212	-	4	150				I
Set	5.3	4.8	150	150	1.9	58	208	-	4	146				I

430

426

La representación gráfica se adjunta en la figura 11.

$$A/Ad = 426/430 = 1 \quad \text{según } (34a)$$

a) Si el nivel de fertilidad es óptimo :

$$P/Px = 0.968 \quad \text{según } (28a)$$

b) Considerando diferentes niveles de fertilidad, según (35b).

- para $Pd/Px = 0.9$, $P/Pd = 0.9$

- para $Pd/Px = 0.7$, $P/Pd = 0.7$

- para $Pd/Px = 0.5$, $P/Pd = 0.5$

CASO 8

Cultivo: caraota

Serie: Boconó

Textura: arenoso

Pozo: G8

Cuadro 13 : Datos y cálculos Caso 8.

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>	
Mes	Eo	Ex	D	W	Smx	^s Wx	^o Wx	efecto
Nov	4.9	2.0	16	260	1.6	74	90	+
Dic	5.4	4.3	50	290	1.6	61	111	+
Ene	6.5	6.1	60	260	1.3	56	116	+

La representación gráfica se adjunta en la figura 11.

Cuadro 14 : Datos y cálculos Caso B.

	<u>11/</u>	<u>13/</u>	<u>14/</u>	<u>12/</u>	<u>15/</u>		<u>17/</u>	<u>18/</u>	<u>19/</u>	<u>20/</u>
Mes	p	hcc	hmx	Ex	s	efecto*	Fx	Fx	SW	F
Nov	54	0.22	0.13	60	14	0				
Dic	76	0.22	0.13	133	45	+	12	0.4	240	0
Ene	37	0.22	0.14	189	48	+	104	3.4	200	0

<u>21/</u>	<u>22/</u>	<u>10/</u>
E	E/Ex	cnd.
60	1.00	II
121	0.91	IV
85	0.45	IV

2.36

$$E/Ex = 2.36/3 = 0.79$$

$$P/Px = 0.84$$

Según (23)

* Cálculo indicado en el anexo 3 del Apéndice

CASO 9

Cultivo: algodón

Serie: Boconó

Textura: arenoso

Pozo: G 8

Cuadro 15: Datos y cálculos Caso 9.

	<u>1/</u>	<u>2/</u>	<u>3/</u>	<u>4/</u>	<u>5/</u>	<u>6/</u>	<u>7/</u>	
Mes	Eo	Ex	D	W	Smx	^s Wx	^c Wx	efecto
Jul	4.2	1.3	10	136	1.7	82	92	+
Ago	4.5	1.8	38	126	2.1	75	113	+
Set	5.3	3.2	70	144	2.0	66	136	+
Oct	4.8	3.8	102	170	2.0	63	165	+
Nov	4.9	4.3	120	240	1.9	61	181	+
Dic	5.4	4.9	120	290	1.7	59	179	+

La representación gráfica se adjunta en la figura 12.

CUADRO 16 Datos y cálculos Caso 9

	<u>11/</u>	<u>12/</u>	<u>13/</u>	<u>14/</u>	<u>15/</u>	<u>16/</u>		<u>10/</u>
Mes	p	Ex	hcc	hmx	s	s+p	efecto	cond
Jul	176	42					0	
Ago	263	57					0	
Set	77	96	0.22	0.12	67	144	0	
Oct	134	118					0	
Nov	54	129	0.22	0.12	114	168	0	
Dic	75	152	0.22	0.13	108	183	0	

$$E/Ex = 3/3 = 1.0$$

$$P/Px = 1.0 \quad \text{según } \boxed{23}$$

* Cálculo indicado en el anexo 3 del Apéndice

En síntesis, los resultados obtenidos, relacionados con la profundidad promedio del nivel freático durante todo el desarrollo del cultivo, se presentan en el cuadro 17.

Cuadro 17: Productividad promedio, **P/Px**, de tres cultivos en tres series de suelo del sistema

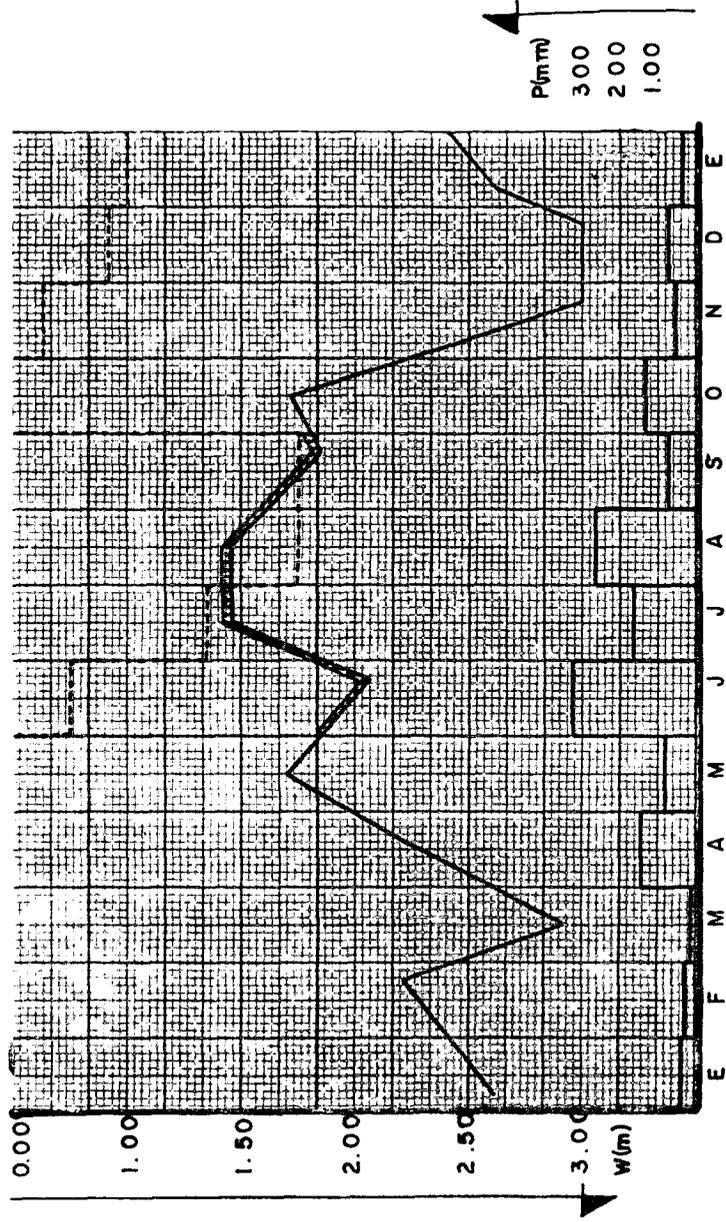


FIGURA II
Representación Grafica Casos 7.y B

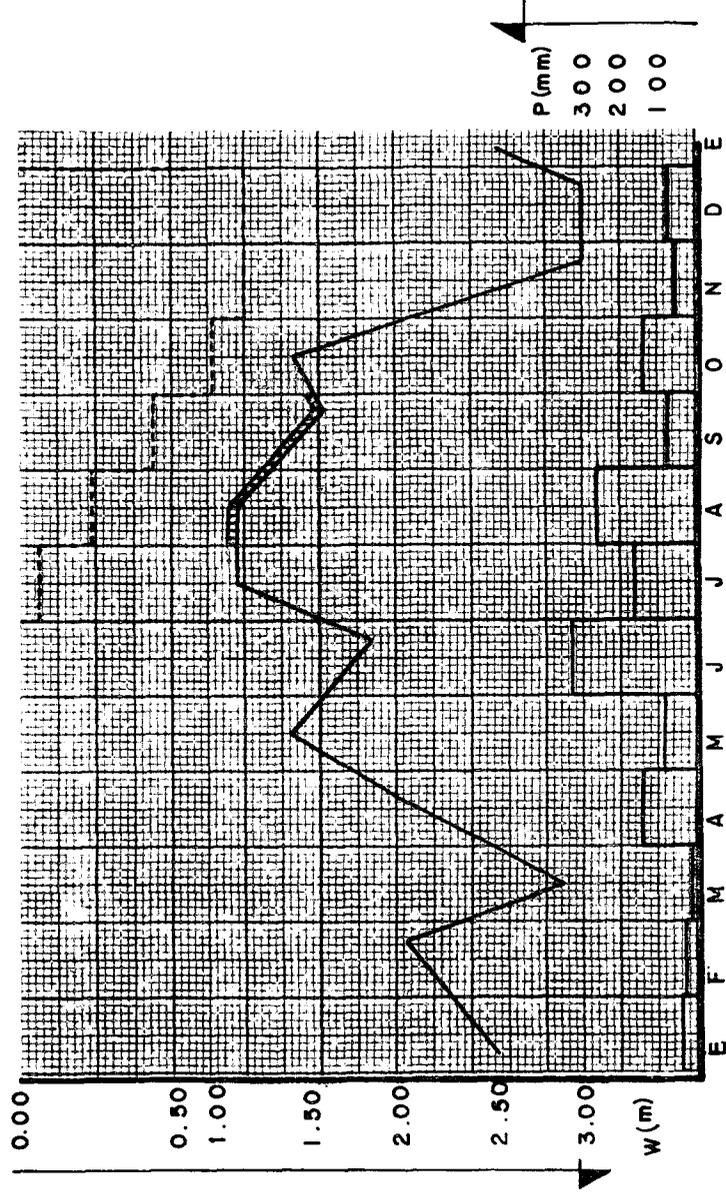


FIGURA 12
Representación Grafica Caso 9

Boconó—Masparro, bajo la influencia de niveles freáticos promedios durante todo el desarrollo del cultivo.

suelo	maíz		caraota		algodón	
	P/Px	W	P/Px	W	P/Px	W
Mendez	0.21	35	0.91	164	0.81	66
Fanfurria	0.71	62	1.00	83	0.89	68
Boconó	0.97	146	0.84	270	1.00	184

- 1/ Cuadro A.2.0.
- 2/ Cuadro A.3.3, A.3.4 o A.3.5, según se trate de maíz, caraota, o algodón.
- 3/ Cuadro A.3.0, A.3.1 o A.3.2, según se trate de maíz, caraota o algodón.
- 4/ Figura A.2.1, A.2.2 o A.2.3, según se trate de pozo F 10, I8 + 400, o G 8
- 5/ Figura A.1.4, A.1.5. o A.1.6, según se trate de Serie Méndez, Fanfurria o Boconó.
- 6/ Figura A.1.2, A.1.3 o A.1.1, según se trate de Serie Fanfurria Boconó o Méndez.
- 7/ Fórmula (22) : ${}^cW_x = {}^sW_x + D$
- 8/ Figura A.1.8.
- 9/ Fórmula : $Z = W \pm Y$
- 10/ Cuadro 3
- 11/ Cuadro A.2.0.
- 12/ Fórmula : $\sum Ex = (Ex) (N)$
- 13/ Figura A.2.0.
- 14/ Figura A.2.0, según el valor de S_{mx}
- 15/ Fórmula (52) : $s = \bar{D} (h_i - h_f)$
- 16/ De 11/ y 15/
- 17/ Fórmula (53) : $\sum F_x = \sum Ex - (p + s)$
- 18/ Fórmula (54) : $\bar{F}_x = \sum F_x / N$
- 19/ De 3/ y 4/ : ${}^sW = W - D$
- 20/ Por iteración : figura A.1.1, A.1.2 o A.1.3, según se trate de Serie Méndez, Fanfurria o Boconó y Figura A.1.7.
- 21/ Fórmula (51) : $\sum E = \sum F + p + s$
- 22/ De 12/ y 21/