



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDRICOS



PROGRAMA
CURSO DE CAPACITACION RIEGO EN FRUTALES

HORARIO	MIERCOLES 12	JUEVES 13	VIERNES 14	SABADO 15
09:00 - 10:30	Evapotranspiración (Dr. J.Jara)	Fisiología del estrés (Dr. E. Fereres)	Selección y calidad al riego de métodos para frutales (Dr. E.Holzapfel)	Gira a terreno (PEUMO) Visita huertos frutales empresas: - Rosa Sofruco - Viña Concha y Toro
	CAFE	CAFE	CAFÉ	
11:00 - 12:30	Necesidades hídricas (Dr. E. Fereres)	Frecuencia y oportunidad del riego (Dr. F.Zazueta)	Manejo y operación de sistemas de riego (Dr. F.Zazueta)	
15:00 - 16:30	Relaciones aguas producción (Dr. E.Fereres)	Métodos de programación (Dr. F. Zazueta)	Riego y contaminación (Dr. J.L.Arumi)	
	CAFE	CAFE	CAFE	
17:00 - 18:30	Patrones de extracción de agua (Dr. E.Fereres)	Riego deficitario controlado (Dr. F.Zazueta)	Impacto del mal drenaje (Dr. L.Salgado)	

FIN - FR - V - 2003 - 1 - A - 016 HA

RELACIONES HIDRICAS EN FRUTALES

Dr. Jorge Jara R.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Evapotranspiración de referencia (ET_0)

La evapotranspiración de un cultivo (ET_C) se puede determinar a través de la expresión:

$$ET_C = ET_0 K_C$$

En donde:

ET_0 = evapotranspiración del cultivo de referencia

K_C = coeficiente de cultivo

Como cultivo de referencia se utilizó primeramente una empastada gramínea. Sin embargo, investigaciones posteriores sugirieron la conveniencia de utilizar alfalfa como cultivo de referencia, en especial en climas áridos, dada sus características aerodinámicas semejantes a la de los cultivos agrícolas. A veces se utiliza el término “*evapotranspiración potencial*”, ET_p , como sinónimo de la evapotranspiración de referencia, aún cuando ET_p es un término acuñado por Penman para definir la evapotranspiración de una pradera nunca falta de agua y permanentemente húmeda, situación normal para el clima de Inglaterra pero no común para cultivos agrícolas en otras latitudes. Las unidades de medida de la evapotranspiración suelen ser mm día^{-1} , mm mes^{-1} o mm temporada^{-1} .

El coeficiente de cultivo, K_C , es adimensional, y varía con el cultivo y su estado de desarrollo vegetativo. El valor de K_C engloba aspectos relacionados con el grado de cobertura vegetal, la resistencia de la cubierta vegetal al intercambio de vapor de agua, la rugosidad aerodinámica de esta y el albedo o coeficiente de reflexión de la radiación solar. La obtención de los valores de K_C se realizan bajo condiciones de óptimo abastecimiento de agua, nutrientes y estado sanitario del cultivo.

Las diferencias en los valores de K_C que se observan en la literatura para un mismo cultivo o frutal se pueden deber, además de la variabilidad inherente a cada especie, a si se utilizó alfalfa u otro tipo de empastada como cultivo de referencia. Es así que si es alfalfa, los valores de K_C serán siempre ≤ 1 . En cambio, si es gramínea, K_C podrá alcanzar valores de hasta 1.2 (Tabla 1).

TABLA 1. Coeficiente de cultivo K_C para frutales según estado de desarrollo.

ESPECIE	PORCENTAJE DE LA ESTACION DE CRECIMIENTO					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
	Inicio brotación	Desarrollo vegetativo	Medía	estación	Inicio madurez	Madurez, caída del hojas
Frutales hojas caduca	0.40-0.50	0.50-0.85	1.10-1.20		1.00-0.90	0.90-0.5
Citricos y paltos	0.60-0.70	0.60-0.70	Promedio 1.00	0.80 0.90	0.90-0.70	0.70-0.6
Frutales con cubierta verde						

La determinación de ET_0 se puede realizar de diferentes maneras. Para los propósitos de este curso, se analizarán tres metodologías.

1. Datos históricos de evapotranspiración de referencia.

ET_0 ha sido determinada para diversas localidades del país (CNR-CIREN, 1997). Las tablas 2 y 3 entregan valores de ET_0 para lugares representativos del secano interior y costero de la VI, VII y VIII regiones del país, los que son promedios de varias temporadas y deben, por tanto, ser utilizadas en ese contexto.

TABLA 2. Evapotranspiración de referencia (ETO) para diversas comunas del secano interior de la VI, VII y VIII regiones del país^(*).

Nº	COMUNAS	ETO (mm/día)											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1	Las Cabras	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
2	Chépica	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
3	Santa Cruz	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.40	3.5	4.8	5.9
4	Pumanque	6.0	5.2	3.65	2.2	1.2	0.9	1.0	1.4	2.3	3.3	4.5	5.7
5	Palmilla	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
6	Peralillo	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
7	Litueche	5.7	4.9	3.48	2.1	1.2	0.8	0.9	1.3	2.2	3.1	4.3	5.3
8	Marchigüe	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
9	Molina	5.8	5.0	3.52	2.2	1.2	0.8	1.0	1.4	2.2	3.2	4.4	5.4
10	Sagrada Familia	5.8	5.0	3.52	2.2	1.2	0.8	1.0	1.4	2.2	3.2	4.4	5.4
11	Hualañe	5.8	5.0	3.52	2.2	1.2	0.8	1.0	1.4	2.2	3.2	4.4	5.4
12	Rauco	5.8	5.0	3.52	2.2	1.2	0.8	1.0	1.4	2.2	3.2	4.4	5.4
13	Talca	6.2	5.3	3.81	2.3	1.3	0.9	1.0	1.5	2.3	3.4	4.7	5.8
14	Maule	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
15	Empedrado	5.5	4.8	3.39	2.1	1.1	0.8	0.9	1.3	2.2	3.1	4.2	5.2
16	Parral	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
17	Retiro	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
18	San Javier	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
19	Cauquenes	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
20	Nacimiento	6.2	5.4	3.81	2.3	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.7	5.9
21	Cabrero	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
22	Yumbel	6.0	5.2	3.65	2.2	1.2	0.9	1.0	1.4	2.3	3.3	4.5	5.7
23	San Rosendo	6.1	5.2	3.71	2.3	1.3	0.9	1.0	1.4	2.3	3.4	4.6	5.7
24	San Nicolas	6.3	5.4	3.84	2.4	1.3	0.9	1.0	1.5	2.4	3.5	4.8	5.9
25	Quillón	5.8	5.0	3.5	2.2	1.2	0.8	0.9	1.4	2.2	3.2	4.4	5.5
26	Quirihue	5.7	4.9	3.4	2.1	1.2	0.8	0.9	1.3	2.1	3.1	4.3	5.3
27	Ninhue	5.8	5.0	3.5	2.2	1.2	0.8	0.9	1.4	2.2	3.2	4.4	5.5
28	Ranquil	5.8	5.0	3.5	2.2	1.2	0.8	0.9	1.4	2.2	3.2	4.4	5.4
29	Contulmo	4.9	4.3	3.0	1.8	1.0	0.7	0.8	1.1	1.9	2.8	3.8	4.7
30	Santa Juana	5.3	4.6	3.2	2.0	1.1	0.8	0.8	1.2	2.0	3.0	4.0	5.0
31	Florida	5.6	4.8	3.3	2.1	1.2	0.8	0.9	1.3	2.1	3.1	4.2	5.2

^(*) Valores derivados de CNR-CIREN (1997)

TABLA 3. Evapotranspiración de referencia (ET_O) para diversas comunas del secano costero de la VI, VII y VIII regiones del país^(*).

N°	COMUNAS	ETO (mm/día)											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
32	Pichilemu	4.4	4.0	3.0	2.0	1.4	1.0	1.1	1.48	2.0	2.7	3.5	4.2
33	Paredones	4.6	4.1	3.1	2.1	1.4	1.1	1.1	1.55	2.1	2.9	3.6	4.4
34	Licanten	5.0	4.5	3.4	2.3	1.6	1.2	1.3	1.71	2.4	3.2	4.0	4.9
35	Vichuquen	4.7	4.3	3.2	2.2	1.5	1.1	1.2	1.61	2.2	3.0	3.8	4.4
36	Constitucion	4.6	4.1	3.1	2.1	1.4	1.1	1.1	1.55	2.1	2.9	3.6	4.4
37	Curepto	4.9	4.4	3.3	2.3	1.5	1.2	1.3	1.65	2.3	3.1	3.9	4.7
38	Pelluhue	4.6	4.1	3.1	2.1	1.4	1.1	1.2	1.55	2.2	2.9	3.6	4.4
39	Chanco	4.6	4.1	3.1	2.1	1.4	1.1	1.2	1.55	2.2	2.9	3.6	4.4
40	Cobquecura	4.6	4.1	3.1	2.1	1.5	1.1	1.1	1.55	2.1	2.9	3.6	4.4
41	Tirua	4.0	3.5	2.7	1.9	1.3	1.0	1.0	1.35	1.9	2.6	3.2	3.9
42	Cañete	4.2	3.8	2.8	2.0	1.3	1.0	1.1	1.42	2.0	2.7	3.3	4.1
43	Los Alamos	4.2	3.8	2.8	2.0	1.3	1.0	1.1	1.42	2.0	2.7	3.3	4.1
44	Lebu	4.2	3.8	2.8	2.0	1.3	1.0	1.1	1.42	2.0	2.7	3.3	4.1
45	Arauco	4.5	4.0	3.0	2.2	1.4	1.2	1.1	1.52	2.1	2.8	3.5	4.3
46	Hualqui	4.7	4.2	3.2	2.2	1.5	1.1	1.2	1.58	2.2	3.0	3.7	4.5
47	Tome	4.5	4.0	3.0	2.1	1.4	1.2	1.1	1.52	2.1	2.8	3.6	4.3

^(*) Valores derivados de CNR-CIREN (1997)

Como una manera de mejorar el uso de esta información, puede ser aconsejable para períodos mas secos o calurosos que lo normal, el aumentar dichos valores en un 10 a 15%. Similarmente, para períodos más húmedos o fríos, sería recomendable disminuir ET_O de tablas en un 10 a 15%.

2. Evaporación de bandeja (E_b)

Muchos investigadores han propuesto utilizar la evaporación desde una superficie libre de agua para programación del riego. El uso de la Bandeja clase A (diámetro = 121 cm, altura = 25.4 cm, altura de agua = 5 a 7.5 cm), instalada sobre una plataforma de madera –de modo que el tope superior de la bandeja esté alrededor de 40 cm sobre el nivel del suelo- y pintada interna y externamente con pintura aluminio, permite estimar ET_O mediante la expresión:

$$ET_O = E_b * K_b$$

En donde:

E_b = evaporación de bandeja (mm día⁻¹)
 K_b = coeficiente de bandeja (0.35 a 0.85)

El valor de K_b es siempre menor a 1, ya que la evaporación desde una superficie libre de agua será mayor a la de un cultivo de referencia debido a:

- El albedo del agua o coeficiente de reflexión de la radiación solar (5 a 8%) es menor al de la superficie de un cultivo (20 a 25%), lo que implica una mayor cantidad de energía solar absorbida por la bandeja.
- La bandeja almacena calor y ocurre evaporación durante la noche.
- En la bandeja no hay control o resistencia estomática.
- La rugosidad aerodinámica es diferente entre una superficie libre de agua y una cubierta vegetal.

En general, el valor de K_b aumenta cuando las condiciones de humedad relativa aumentan y, simultáneamente, disminuye la velocidad de viento. Además, las condiciones del terreno (tipo y presencia o ausencia de vegetación) en el sentido de la dirección predominante del viento, influyen en la determinación de K_b .

3. Modelos de predicción de ET_O (Hargreaves y Samani).

En la literatura se encuentran múltiples modelos que permiten predecir ET_O a partir de información meteorológica. Samani (2000) informa de un modelo (Hargreaves y Samani) que permite estimar evapotranspiración usando un mínimo de datos climatológicos. Dicho modelo puede representarse como:

$$ET_O = \beta * \alpha * R_a * (TP + 17.8)$$

En donde:

ET_O = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

β y α = coeficiente empíricos de ajuste local

R_a = radiación solar al tope de la atmósfera, expresada en mm día⁻¹ de evaporación

TD = diferencia entre la temperatura máxima y mínima del día (°C)

TP = promedio diario de temperatura del aire (°C)

Los valores de β y α han sido determinados para algunas localidades de Chile (Mercado, 2003), siendo relativamente constantes a lo largo del país (Tabla 4).

TABLA 4. Valores sugeridos de los coeficientes empíricos β y α de la ecuación de Hargreaves y Samani (Mercado, 2003).

LOCALIDAD	β	α
Canchones	0.02	0.12
Vicuña	0.03	0.09
Chillán	0.01	0.15
Temuco	0.03	0.1

La radiación solar al tope de la atmósfera (R_a) es función de la latitud y día del año. La tabla 5 entrega información referente a R_a .

TABLA 5. Radiación solar al tope de la atmósfera, expresada en mm día⁻¹ de evaporación, según latitud y época del año para el hemisferio sur.

LATITUD (°)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
20	17.3	16.5	15.1	13.0	11.0	10.0	10.4	12.1	14.3	16.1	17.1	17.4
25	17.5	16.5	14.7	12.2	9.9	8.8	9.3	11.2	13.7	15.9	17.3	17.7
30	17.7	16.4	14.1	12.3	8.8	7.4	8.1	10.2	13.0	15.6	17.3	18.0
35	17.7	16.1	13.5	10.3	7.7	6.4	6.9	9.1	12.2	15.2	17.3	18.2
40	17.7	15.8	12.7	9.2	6.5	5.2	5.7	8.0	12.3	14.7	17.2	18.2
45	17.5	15.3	11.9	8.1	5.3	4.0	4.5	6.8	10.3	14.1	16.9	18.2

Si para enero 15, en Vicuña (Latitud 30°S) se registran temperaturas máximas y mínimas de 36 y 10°C, respectivamente, entonces $R_a = 17.7$ mm día⁻¹ (Tabla 5), $\beta = 0.03$ y $\alpha = 0.09$ (Tabla 4), $TD = 26^\circ\text{C}$ y $TP = 23^\circ\text{C}$, al utilizar el modelo en estudio, la evapotranspiración de referencia será:

$$ET_0 = 0.03 * 0.09 * 17.7 * (23 + 17.8)$$

$$ET_0 = 9.9 \text{ mm día}^{-1}$$

La bondad de ajuste del modelo para diferentes períodos de tiempo, indica errores de estimación de alrededor de 1 mm día⁻¹ o inferior, según la escala de tiempo que utilice (Tabla 6).

TABLA 6. Error en la estimación de la evapotranspiración de referencia según escala de tiempo del pronóstico y localidad.

PERIODO PRONOSTICO	ERROR (mm día ⁻¹)		
	VICUÑA	CHILLAN	TEMUCO
Mensual	0.90	0.51	0.49
10 días	0.93	0.61	0.54
7 días	0.94	0.66	0.57
5 días	0.96	0.72	0.61
3 días	0.99	0.83	0.68
1 día	1.10	1.13	0.91

Fuente : Mercado (2003)

Además de la facilidad de uso del modelo de Hargreaves y Samani, resulta de interés el utilizarlo como predictor de futuras evapotranspiraciones. En efecto, la bondad de ajuste del modelo utilizando pronósticos de temperatura dependerá de la calidad de predicciones diarias de las temperaturas máximas y mínimas para una localidad.

Actualmente, es posible disponer de pronósticos de temperaturas del aire hasta por cinco días. Así, un análisis de pronósticos de temperaturas a tres días para Chillán, NOV-DIC año 2001, entregó un error promedio en las estimaciones de temperaturas máximas y mínimas de 2.0° y 1.9°C, respectivamente. Lo anterior, incidió en que el error en predecir ET_O usando dichos pronósticos de temperatura alcanzará los 1.26 mm día⁻¹, lo que se debe comparar con el error de predicción de ET_O de 1.19 mm día⁻¹ utilizando los datos reales de temperatura para dicho período.

Aún cuando la magnitud del error de predicción de ET_O fue superior a los 0.83 mm día⁻¹ (Tabla 6), resulta necesario destacar que a partir de noviembre hasta diciembre del 2001 hubo como promedio evaporaciones de bandeja de 10 mm día⁻¹, registrándose en seis días valores sobre los 12.5 mm día⁻¹, con un máximo de hasta 15 mm día⁻¹, lo que explicaría la magnitud del error (Mercado, 2003).

Determinación de la evapotranspiración de cultivo (ET_C).

El cálculo de ET_C para árboles debe considerar la edad, marco de plantación y grado de cobertura o sombreado de estos.

Para un árbol adulto, con cobertura vegetal mayor al 70%, se utiliza:

$$ET_C = ET_O * K_C$$

En donde ET_O representa la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día⁻¹) y K_C el coeficiente de cultivo (Tabla 1) para un árbol adulto.

Para árboles pequeños, con valores de cobertura superiores al 10% e inferiores al 70%, las siguientes relaciones son comúnmente usados para predecir ET_C :

Ecuación de Walker :

$$ET_C = ET_O * K_C$$

Ecuación de Fereres-Holzapfel :

$$ET_C = ET_O * K_C (1.28 * P + 0.1125)$$

En donde P representa la fracción e cobertura ($0.1 < P < 0.7$), y que se determina a partir de:

así,

en donde:

DS = diámetro de la sombra proyectada en el suelo por el follaje del árbol al medio día solar (m)

E_{sn} = espaciamiento sobre la hilera (m)

E_{ch} = espaciamiento entre hileras (m)

De este modo, el volumen mínimo de agua a reponer por árbol (V_{mr}) se puede estimar a partir de:

$$V_{mr} = ET_C * E_{ch} * E_{sh}$$

Con unidades de V_{mr} en $L \text{ día}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$ para ET_C expresada en $mm \text{ día}^{-1}$ y los espaciamientos en metros.

Ejemplo:

Si el marco de plantación es 3×2.5 m, el diámetro de sombra al $\frac{1}{2}$ día es de 2.3 m, $ET_O = 5$ $mm \text{ día}^{-1}$ y para un árbol adulto $K_c = 0.8$, entonces:

y usando la aproximación Fereres-Holzapfel:

$$ET_C = 5 \text{ mm/día} * 0.8 (1.28 * 0.55 + 0.1125)$$

$$ET_C = 3.3 \text{ mm/día}$$

Entonces, el volumen mínimo de agua a reponer para árbol (V_{mr}):

$$V_{mr} = 3.3 \text{ mm/día} * 3 \text{ m} * 2.5 \text{ m}$$

$$V_{mr} = 24.8 \text{ L día}^{-1} \text{ árbol}^{-1}$$

Si lo que se desea es reponer el 100% del agua evapotranspirada por el árbol, entonces dicho valor se debe incrementar al considerar la eficiencia de aplicación del agua de riego y la uniformidad de aplicación.

Monitoreo de la condición hídrica del árbol

Existen diversas técnicas para determinar el status hídrico de la planta. Lo ideal sería monitorear directamente el árbol, pero razones de costo y/o falta de investigaciones específicas por especie y variedad –unido a la inherente variabilidad de la característica que se desea medir- hacen necesario recurrir a mas de un tipo de monitoreo en la planta (Naory Cohen, 2003) o a las mediciones de agua en el suelo.

Entre las mediciones mas comunes o frecuentes que se podrían realizar en la planta, destacan:

- Potencial de agua (Bomba Scholander)
- Resistencia o conductancia estomática (Porómetro)
- Temperatura de la cubierta vegetal (Termómetro infrarrojo)
- Flujo de savia (Medidores de flujo)
- Dendrometría (Dendómetro)

En las mediciones de contenido de agua en el suelo factibles de poder realizar a nivel de campo, destacan:

- Contenido de humedad (gravimetría, neutrometría, TDR, etc.)
- Tensión de agua (tensiómetro)

Este tipo de monitoreo del agua en el suelo exige hacer mediciones frecuentes, a intervalos regulares, justo antes del riego en caso de goteo, cinta o microaspersión –o bien en períodos un poco más espaciados en caso de regarse por surcos u otro método gravitacional-. De este modo, será posible observar la tendencia en los cambios de humedad del suelo y tomar las medidas correctivas que la situación amerite. Asimismo, el muestreo debe ocurrir en aquellos puntos característicos tanto en distancia del emisor y/o tronco del árbol, como en profundidad. De este modo, será posible realizar una caracterización de la evolución de humedad del suelo y su relación con la cantidad de agua que se está aplicando.

La variabilidad en las mediciones de humedad del suelo es un aspecto de interés a considerar en la programación del riego, no solo por la variabilidad espacial de los suelos sino que, además, por las características inherentes a los sensores utilizados (Schmitz y Sourell, 2000).

BIBLIOGRAFIA

- CNR-CIREN. 1997. Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile. Comisión Nacional de Riego y Centro de Información de Recursos Naturales (CORFO). Santiago, Chile. 54p.
- Mercado, E., Gabriel. 2003. Estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando datos de temperatura del aire. Proyecto de Tesis Magister en Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción (En prensa).
- Naor, A. y S. cohen. 2003. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. Hort Science 38(4):547-551.
- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 126(4). 265-267.
- Schmitz, Martin y Heinz Soorell. (2000). Variability in soil moisture measurements. Irrigation Science 19:147-151.

Deciduous Fruit and Nut Trees

ELIAS FERERES

*University of Cordoba
Cordoba, Spain*

DAVID A. GOLDHAMER

*University of California
Parlier, California*

Most deciduous fruit and nut orchards are located in temperate zones where rainfall is insufficient to meet tree water demand throughout the season. Irrigation practices that supply orchards with adequate water must be based on quantitative knowledge of tree water requirements and of tree responses to soil water supply. Such knowledge must be acquired through experimentation which, in the case of trees, should span a substantial fraction of the active life of the orchard. Long-term field experiments are the exception rather than the norm in agricultural research activities of recent decades. In addition, fruit and nut trees do not have the economic and social importance of the major herbaceous crops, and research efforts on deciduous fruit and nut trees have been restricted to specific world areas.

Irrigation studies with deciduous fruit and nut trees started long ago (Veihmeyer, 1927) and information on physiological responses to water deficits has substantially increased in recent years (Jones et al., 1985). The amount of available information varies with species, with apple (*Malus sylvestris* Mill.) receiving the most attention. It is evident from the information summarized below that much more research is needed in all other species to achieve a level of understanding of irrigation responses of tree crops similar to that existing for the major irrigated herbaceous crops.

I. GROWTH AND DEVELOPMENT OF DECIDUOUS FRUIT AND NUT TREES IN RELATION TO IRRIGATION

The typical patterns of growth and development of deciduous fruit and nut trees over an annual cycle are shown in Fig. 33-1. Bud growth resumes in the spring following a cold period usually necessary for bud break. Root growth usually accelerates at the same time, with maximum growth occurring in soil areas of low mechanical resistance and of high water content and oxygen supply. Flowering and pollination take place during low evaporative

demand periods and when tree transpiration is small; thus irrigation requirements at full bloom are normally minimal. As spring advances, faster shoot and fruit growth rates lead to full canopy development and increasing irrigation needs in the absence of rainfall. Fruit bud development and morphogenesis are sensitive to water deficits although there is substantial variation among species in their sensitivity. Irrigation not only affects fruit growth and current year harvest but influences following years' crops through its effects on bud development, morphogenesis, and shoot growth. After fruit harvest, vegetative growth may proceed well into the fall depending on the availability of soil water. Postharvest irrigation management is a critical issue as additional shoot growth and carbohydrate storage may or may not be needed to obtain maximum yields in the following year.

Figure 33-1 does not fully illustrate the dynamics of growth and development as they change with environmental conditions and internal plant factors. The competition between fruit growth and other growth forms depends on tree species and the stage of development. Little is known about the dynamics of root growth in relation to shoot development in fruit trees. This is particularly important as the water supply and demand of a fruit tree is determined by the relative size of the shoot and root system. Chalmers and van den Ende (1975) showed in peach that a strong relationship exists between top and root dry weight. The relationship is linear on a logarithmic basis in peach trees varying in age from 3 to 15 yr.

Adequate soil water supply via irrigation should maximize growth and radiation interception in developing tree canopies, shortening the planting to maturation period. Assimilate partitioning is as important as full radiation interception. As in other perennials (Schulze, 1982), there are ontogenetic changes in the distribution of assimilates in fruit trees. In general, the proportion to total dry weight that goes into vegetative growth decreases with age in fruit trees, from 70% for a young peach tree to <30% for a mature tree (Chalmers & van den Ende, 1975). Chalmers (1987) speculated that as the

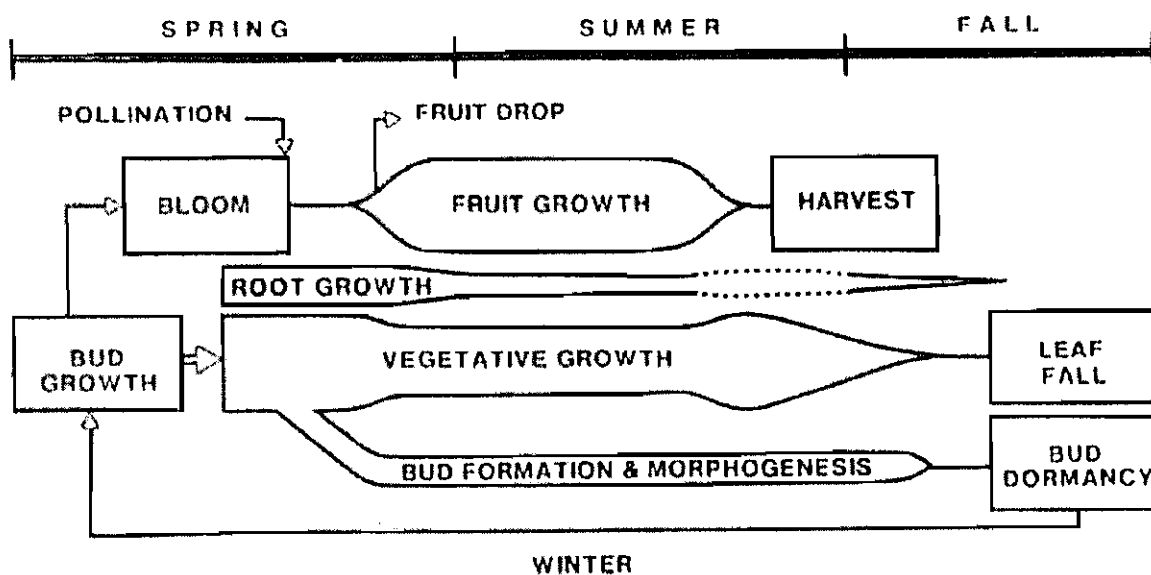


Fig. 33-1. Generalized diagram of the growth and development processes in deciduous fruit and nut trees.

top/root ratio decreases with age, a reduced root system may limit vegetative shoot growth, leading to greater allocation of assimilates to fruits. It follows that harvest indices in fruit crops would increase as trees age or when the growth of the root system is limited by unfavorable soil conditions (Chalmers, 1987).

While the growth and development of all major deciduous tree crops follow more or less the simplified diagram of Fig. 33-1, there are substantial differences among species in the chronology of events. Among nut trees, almond [*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb] trees flower more than 4 wk earlier than pistachio (*Pistacia vera* L.) or walnut (*Juglans regia* L.) and bud development is also completed in a shorter time period. Similar differences may be found among deciduous fruit tree species and cultivars (e.g., peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] vs. apple).

II. ASPECTS OF WATER RELATIONS OF DECIDUOUS FRUIT AND NUT TREES

The water relations of fruit trees may be studied from many viewpoints; aspects that are particularly relevant to irrigation include the evaluation of various measures of tree water status, the role of stomata in controlling transpiration, the interactions between roots and soil water, and adaptation to drought. Two recent articles on the water relations of fruit trees (Jones et al., 1985; Syvertsen, 1985) provide comprehensive reviews on the physiological aspects of tree water relations.

A. Indicators of Tree Water Status

Leaf water potential (ψ) is commonly accepted as an indicator of fruit tree water status (Syvertsen, 1985) despite its questionable relevance in the control of plant physiological processes as affected by water status (Sinclair & Ludlow, 1985; Jones et al., 1985). A major reason for the acceptance of ψ is related to the speed of ψ measurement using a pressure chamber (Ritchie & Hinkley, 1975). Leaf ψ in fruit trees varies on a daily basis (Klepper, 1968; Smart & Barrs, 1973) and on a seasonal basis (Goode & Higgs, 1973), regardless of soil water status. Factors affecting leaf ψ values, other than soil water supply, include evaporative demand, stomatal conductance, hydraulic resistance to water flow and have been reviewed by Jones et al. (1985). Because leaf ψ is influenced by so many variables and can directly be used only to indicate the direction of water flow in the tree, its use as a tree water status indicator is often questioned (Garnier & Berger, 1985). Evidence that similar values could represent quite different plant stress levels has been provided by Bates and Hall (1981), and by Bethell et al. (1979) and Jones et al. (1983) in apple and Garnier and Berger (1985) in peach. In contrast, leaf ψ has proven to be a reliable indicator of tree stress in almond (Ferreres et al., 1981), pistachio (Goldhamer et al., 1985b), apple (Peretz et al., 1984), and in studies of pear (*Pyrus communis* L.) and peach on relatively shallow soils (E. Ferres, 1979, unpublished data).

Sampling for leaf ψ in trees is more difficult than in herbaceous crops as leaf exposure (Jones & Cumming, 1984), height and position within the canopy (Olsson & Milthorpe, 1983), leaf age (Lakso, 1979), presence of fruit (Chalmers et al., 1983; DeJong, 1986), and leaf type (Jones & Cumming, 1984) all affect leaf ψ values. Nevertheless, leaf ψ is often the only practical way of assessing tree water status and irrigation needs under situations of variable soil water content, high water tables, saline soils, or in the case of localized irrigation.

In addition to other leaf water parameters frequently quoted as alternatives to leaf ψ (i.e., leaf relative water content and turgor pressure) (Jones et al., 1985), there is the possibility of monitoring the water content of the stems as a water status indicator in fruit trees—either directly (Brough et al., 1986) or indirectly as trunk shrinkage (Garnier & Berger, 1986). The latter authors found that treatments differing in irrigation levels showed differences in maximum stem shrinkage well before the growth patterns of peach trees were affected by water deficits. Thus, stem shrinkage could be a sensitive indicator if a standard measurement (i.e., a tree with unlimited water supply) were available. Fluctuations in stem diameter may be easily correlated with xylem water potential (Klepper et al., 1971) although there is a lag time in trees due to the capacitance of the stem tissue (Brough et al., 1986). Infrared thermometry (Idso et al., 1981) could be used in fruit trees along the same lines as in herbaceous crops—the assumption being that the partial stomatal closure required to decrease transpiration and thus, elevate canopy temperature, does not decrease marketable yield. Relative differences in tree canopy temperature are related to ψ differences in olive trees (Feres, 1986, unpublished data). This technique as well as stem diameter monitoring shows promise in improving the assessment of irrigation needs directly from tree or orchard measurements.

B. Stomatal Conductance, Leaf Water Potential, and Transpiration

Stomatal behavior in the field reflects the interactions between the C assimilation and transpiration processes (Jarvis & Morison, 1981). Studies in fruit trees demonstrate that radiation, temperature, air humidity, and tree water status all affect stomatal opening (Jones et al., 1985). Of particular interest is the response to air humidity, first described for apricot (*Prunus armeniaca* L.) trees under desert conditions (Schulze et al., 1972) which appear to be responsible for the continuous decline in leaf conductance during the course of the day, irrespective of tree water status (e.g., Castel & Feres, 1982). As evaporative demand increases during the day, diurnal leaf ψ values reflect the balance between stomatal conductance and transpiration rates.

Long-term tree water deficits apparently exert control of leaf ψ via adjustments in stomatal conductance. Figure 33-2a presents data for two treatments in peach that differed in soil water supply (33% of ET supplied via a drip system vs. dryland) that had essentially the same leaf ψ throughout most of the day (E. Feres, 1980, unpublished data). Leaf conductance was

markedly different, suggesting that stomatal conductance controlled leaf ψ in these trees.

It is likely that when long-term water deficits affect stomatal control of tree water status, leaf ψ will not reflect the level of water stress being experienced by the tree. Recently, evidence of the direct influence of soil drought on stomatal conductance has been reported (Schulze, 1986). Additional evidence of the long-term effects of drought on leaf conductance not mediated by tree water status is presented in Fig. 33-2b (E. Fereres, 1981, unpublished data). After 3 yr of drought, peach trees exhibited reduced stomatal conductance in the following spring, even though the soil profile was replenished by winter rains (at least partially). The presence of fruit is known to influence stomatal conductance and water potential in peach (Chalmers et al., 1983; DeJong, 1986). Lower stomatal conductance and higher leaf ψ values have been observed following fruit removal in peach, irrespective of soil and tree water status (E. Fereres, 1979, unpublished data). Additional work is needed to identify the basis for responses such as those described above.

Increases in the rate of transpiration produce a greater drop in the leaf ψ of fruit trees than in that of herbaceous crop plants (Schulze & Hall, 1982). Thus, it appears that hydraulic resistance is of greater magnitude in fruit trees than in herbaceous plants (Jones et al., 1985). Higher resistances in fruit trees may be due to sparser root systems (Atkinson, 1980). Evidence of increased hydraulic resistance caused by localized irrigation in apple trees may be inferred from the data of Perez et al. (1984).

The impact of stomatal control on transpiration rates depends on the degree of coupling between the crop canopy and the atmosphere (Monteith, 1981). Jarvis (1985) indicated that tree crops have aerodynamically rough canopies, are subjected to higher windspeeds because of their height, have

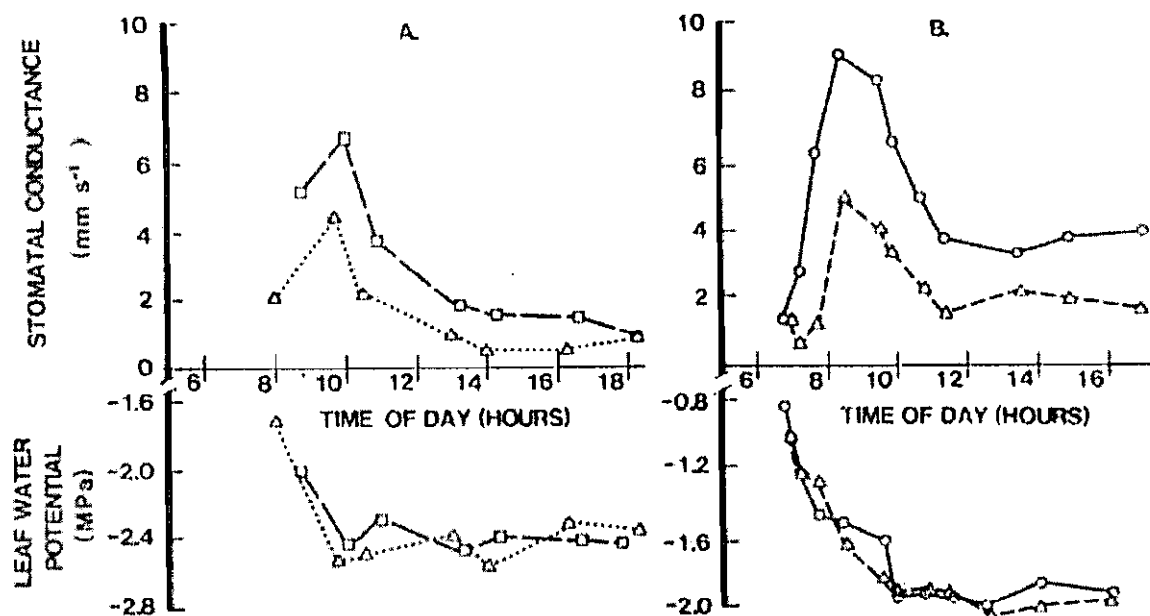


Fig. 33-2. A. Daily course of stomatal conductance (g_s) and leaf water potential (ψ) in peach trees for deficit drip irrigation (33% of ET, squares) and dryland (triangles) treatments on 31 Aug. 1979 in Winters, CA. B. Daily course of g_s and ψ for the fully irrigated (100% ET, circles) and dryland (triangles) treatments on 31 May 1980 after three experimental years in Winters, CA.

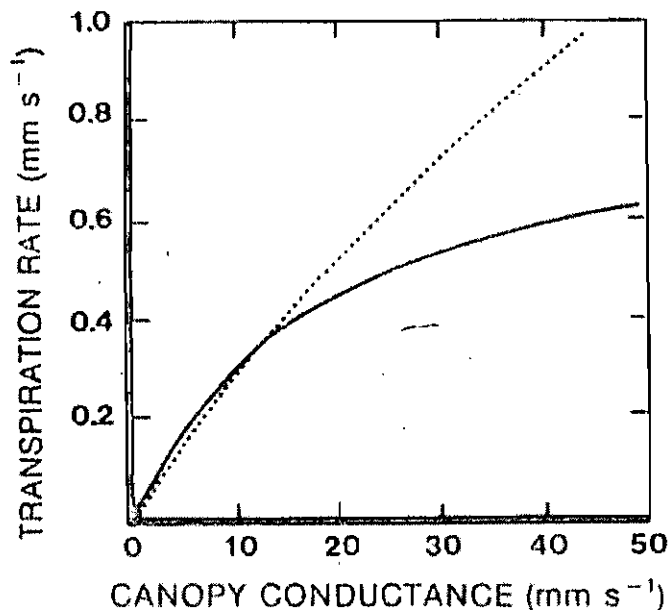


Fig. 33-3. Calculated relationships between canopy conductance and transpiration rate for boundary layer conductances of 50 mm s^{-1} , typical of field crops (solid line), and of 300 mm s^{-1} , typical of trees (dashed line). After Jarvis (1981).

high boundary layer conductances, and therefore, are well coupled to the atmosphere. In contrast, herbaceous crop canopies are smooth, have low boundary layer conductances, and are not coupled to the environment. Figure 33-3 shows data from Jarvis (1981) that demonstrate a change in stomatal conductance will influence the transpiration rate of trees more than that of field crops. Thus, stomatal conductance is effective in controlling transpiration in tree canopies (Jarvis, 1985) and reductions in stomatal conductance should be paralleled by decreases in transpiration and CO_2 assimilation.

C. Root Growth and Water Uptake

It is generally accepted that root density values encountered in fruit trees are less than those found in annual crops (Atkinson, 1980). Root density values per unit ground surface (LA) of 10 to 20 cm cm^{-2} are common in fruit trees while reports of LA values exceeding 300 cm cm^{-2} have been published for crops such as corn (*Zea mays* L.) (e.g., Hsiao & Acevedo, 1974). The sparse top growth in trees could be responsible for the low LA, although Chalmers et al. (1983) reported LA values of only 100 cm cm^{-2} for peach with a Leaf Area Index (LAI) of 10. The perennial growth habit of deciduous trees may be associated with the low root density values. Chalmers and van den Ende (1975) indicated that mature peach trees allocate only 1% of the annual growth increment to root growth. Low rooting densities may limit water uptake in deciduous trees and be partly responsible for relatively large decreases in leaf ψ as transpiration rates increase. However, as will be discussed in section III of this chapter, measured peak transpiration rates from deciduous irrigated orchards commonly exceed those observed in herbaceous crops. Thus, transpiration of fruit trees may not always be limited by low LA values, at least under irrigated conditions.

Irrigation enhances root growth probably because of the concomitant increase in top growth (Atkinson, 1980). Root growth takes place preferentially in soil volumes that have favorable conditions for root proliferation (Taylor, 1983). As soil water influences not only the availability of water and nutrients but also soil strength, variations in the soil water regime largely determine the distribution of roots in the soil.

Root proliferation in the soil surface layers is common in herbaceous crops (Taylor, 1983) as well as in deciduous trees (Chalmers et al., 1983) when such layers are wetted often by irrigation or rainfall. Water extraction in both crop types occurs preferentially from such layers, presumably because of the higher root densities and low axial resistances to water flow in the root system. As the surface soil dries, water uptake patterns change, with the maximum rates of extraction displaced down to the deeper layers (Levin et al., 1972). Drought also reduces the hydraulic conductivity of root systems in trees (Wiersum & Harmany, 1983). Water uptake rates from trees are similar to those described for herbaceous crops (Taylor, 1983) under full coverage irrigation. However, under localized irrigation, rates of water absorption are quite high as roots concentrate around the wetted zones (Nakayama & Bucks, 1986).

Three factors related to irrigation affect root distribution and water uptake in orchards: (i) frequency of irrigation, (ii) depth of applied water, and (iii) pattern of water application (localized or full coverage). The success of localized irrigation, even though water is applied to only a fraction of the potential root zone, has evidenced the plasticity of fruit tree root systems and their capability to adjust to limited wetting patterns. The effects of irrigation method on root systems are further discussed in section IV of this chapter.

D. Adaptation to Drought

In recent years, substantial interest has developed in elucidating the mechanisms of plant adaptation to drought (Feres, 1984). However, most of the research has been carried out with annual crops (Turner, 1986; Feres, 1987). At the leaf level, deciduous fruit and nut trees exhibit adaptive mechanisms similar to those described in annual plants (Feres, 1984; Jones et al., 1985). Water extraction deep in the profile in the absence of irrigation has been described in deciduous trees (Syverstein, 1985) and must have adaptive value. Osmoregulation occurs in apple (Goode & Higgs, 1973), almond (Castel & Feres, 1982), pistachio (Behboudian et al., 1986), peach and pear (Feres, 1979, unpublished data), and probably, to some degree, in most other species. Lakso (1979) associated a large seasonal change in solute potential (around 2 MPa) to the maintenance of stomatal opening in apple trees subjected to water deficits. Pistachio potted plants under water stress continued to photosynthesize at leaf values down to -5 MPa and maintained positive turgor with leaf values as low as -6 MPa (Behboudian et al., 1986). This represents an extreme observation on the drought resistance of deciduous fruit and nut tree species. The long-term effects of drought on stomatal con-

ductance (Fig. 33-2b), probably mediated by the effects of dry soil on the root system (Schulze, 1986), also must have adaptive significance. When stomatal control of transpiration is insufficient to prevent the development of potentially damaging leaf ψ values, leaf shedding is another mechanism frequently observed in deciduous trees that is effective in controlling transpiration. Castel and Fereres (1982) showed that radiation intercepted by almond canopies decreased 30% because of leaf shedding in the presence of increasing drought while midday leaf ψ stayed more or less constant (around -3.5 MPa). Obviously, recovery is not possible after leaf shedding and productivity must be sacrificed in exchange for tree survival. It appears that it takes more than 1 yr for deciduous trees to fully recover from severe water stress (Proebsting et al., 1981). Prune (*Prunus domestica* L.) trees subjected to 1 yr of deficit irrigation (15% of maximum demand) required 2 yr of recovery before attaining normal growth and yield. In the same experiment, growth and production of cherry (*Prunus avium* L.) trees did not recover after 2 yr (Proebsting et al., 1981). Functional recovery of citrus trees following severe water stress also required substantial time (Fereres et al., 1979). While pistachio trees showed almost complete vegetative growth recovery following 1 yr of severe water stress, the yield of marketable product was only half that of unstressed trees (Goldhamer et al., 1985b). This was attributed primarily to increased production of blank and aborted nuts.

III. IRRIGATION MANAGEMENT

A. Evapotranspiration and Water Requirements

Evapotranspiration (ET) losses from orchards are caused by the combination of direct evaporation from the soil surface (E) and transpiration (T) losses from the trees and cover crops if that technique of vegetation management is used. Transpiration losses in orchards without a cover crop are directly related to the amount of radiation intercepted by tree foliage and thus, to canopy size and architecture. Direct E losses are primarily a function of the frequency of surface soil wetting and of the irrigation method (localized or full coverage).

The economics of irrigation developments usually mandate that the maximum possible yields are obtained from irrigated lands. Since productivity and water use are usually considered to be directly related, crop water deficits have traditionally been viewed as detrimental to yield. In herbaceous crops, the full ET requirements are estimated relative to a maximum or reference ET (ET_0) as defined by Doorenbos and Pruitt (1977). ET_0 represents the ET losses from a grass crop where the upper limit is set solely by the evaporative demand of the environment. However, orchard ET is controlled not only by evaporative demand but also by stomatal conductance (see section II.B in this chapter) even if the soil water supply is not limiting. Thus, the use of ET_0 for orchards may be inappropriate. The ET rate of a well-irrigated orchard will be determined by the interactions between evaporative demand

Table 33-1. Midseason crop coefficients (K_c) for mature, clean cultivated deciduous fruit and nut orchards. Based on Doorenbos and Pruitt (1977), Fereres and Puech (1981), and Goldhamer and Snyder (1989).

Species	K_c
Almond, apricot, peach, pear, and plum	0.9–0.95
Apple, cherry	0.95–1.0
Walnut, pecan	1.05–1.15
Pistachio	1.15–1.20

(radiation balance, windspeed, and vapor pressure gradient) and the canopy conductance. Orchard canopy conductance reflects direct stomatal responses to air humidity (Schulze et al., 1972), to the presence of fruits and their stage of development (Chalmers et al., 1983; DeJong, 1986), and possibly to long-term drought (Fig. 33-2b) among other factors.

Notwithstanding the above statement, most researchers have found it convenient to relate measured ET either to ET_o or to pan evaporation (E_o). The use of E_o as a reference adds uncertainty, as the environment around the pan is seldom standardized in orchards, and bare soil, tree shade, etc., all influence the E_o rate for a given evaporative demand (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Information on estimated orchard ET is scant. Most ET data from orchards have been obtained through a water balance technique that is often too crude to provide accurate estimates for short time periods. There are few cases where the ET of deciduous fruit or nut trees has been measured in lysimeters (e.g., Worthington et al., 1984). An added complication is that the spatial variation in root distribution in orchards increases the number of measurements required by a water balance technique. Summary information reviewed by Doorenbos and Pruitt (1977) and by Fereres and Puech (1981) permits the estimation of empirical crop coefficients relative to ET_o (K_c) which can be used to obtain a first approximation of the typical, maximum ET requirements of mature orchards. Table 33-1 presents the midseason crop coefficients for different tree species. If a K_c curve needs to be developed, the procedure proposed by Doorenbos and Pruitt (1977) may be used, assuming that it takes from 8 to 12 wk from leafout to reach the K_c values of Table 33-1. The initial K_c would depend on the degree of soil surface wetness and soil management practices (Doorenbos & Pruitt, 1977). Sometime before leaf fall, K_c values tend to drop, reflecting leaf aging effects on T. The time at which K_c starts to drop is affected by irrigation management and by variation among tree species. Snyder et al. (1987) developed a leaflet for California conditions based on the data and procedures discussed above.

The higher K_c values reported in Table 33-1 for some nut tree species (walnut, pecan, and pistachio) deserve attention. Tree height is greater in mature walnut and pecan trees than in other species and that may increase windspeed and boundary layer conductance (Jarvis, 1985). The high midseason K_c of pistachio is probably related to the relatively high stomatal conductance values of this species (up to 16 mm s^{-1}) (Goldhamer et al., 1985b).

and to the presence of stomata on the abaxial and adaxial sides of the leaf. Usual stomatal conductance values during peak evaporative demand periods for other deciduous trees normally do not exceed 10 mm s^{-1} (Jones et al., 1986).

The fact that peak ET rates from most deciduous fruit trees are similar to ET_a (Table 33-1) despite the higher windspeeds and boundary layer conductances of orchards may be explained by the declining diurnal trends in stomatal conductance discussed above. Since trees are well coupled to the atmosphere (Jarvis, 1985), the decrease in stomatal conductance throughout the day may compensate the increases in radiation load and vapor pressure deficits, resulting in T reduction.

There are occasional reports of tree ET rates exceeding the typical values of Table 33-1. High density peach trees reportedly had an estimated K_c of 1.3 (Natali et al., 1985). Crop coefficients approaching 1.40 have been reported for a high-density, tall pecan orchard (Miyamoto, 1983) and values varying from 1.3 to 1.6 have been estimated in an apple experiment (Beukes & Weber, 1982). Certainly, orchards with cover crops use 25 to 30% more water than clean cultivated orchards (Doorenbos & Pruitt, 1977; Bethell et al., 1979). In most orchards, some space between the trees must be cleared to allow for orchard operations (spraying, harvesting, etc.). Thus, trees do not intercept all incoming radiation but only a fraction, ranging from 60 to 80% in mature orchards. Thus, 20 to 40% of the incoming radiation is available for additional E if the soil surface is wet or if there is a cover crop. However, if the ground surface is clean cultivated and dry, the incoming radiant energy heats up the soil and the air around it, contributing energy to the transpirational process of the tree leaves. This microadvection (Fereres

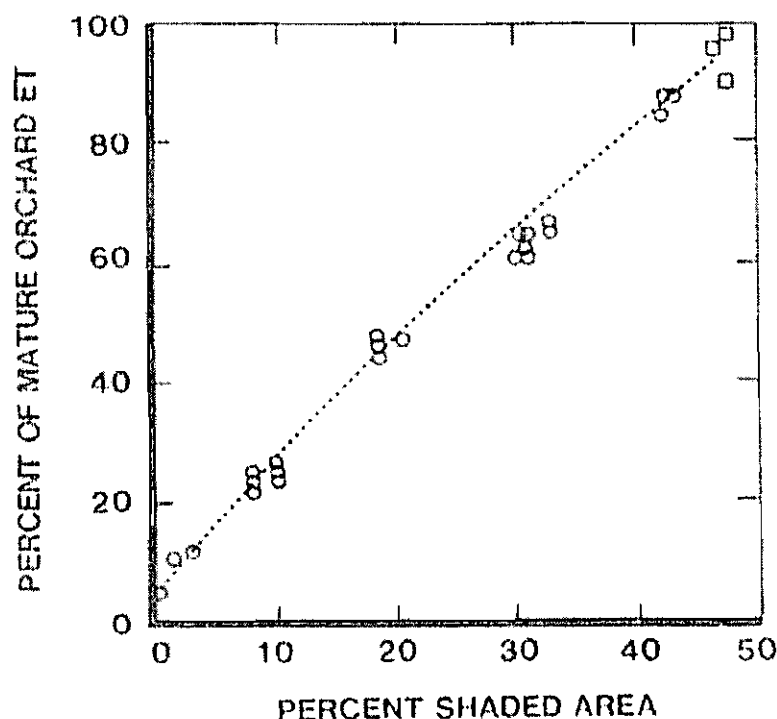


Fig. 33-4. Relationship between shaded area and ET in young almond trees relative to that of a mature orchard. Data obtained from drip-irrigated trees from 1 to 4 yr old (circles) and in a 6-yr-old orchard (squares) by using soil water balance techniques. After Fereres et al. (1989).

et al., 1981) is probably responsible for the reported lack of differences in the ET of mature orchards differing in canopy cover once they exceed 50 to 60% cover (Black et al., 1977; Doorenbos & Pruitt, 1977).

In the case of newly planted orchards, the percent cover by the trees is minimal and increases with age. Thus, the ET of young orchards is highly dependent on the irrigation frequency and the soil wetting patterns. The ET of young almond trees, experimentally determined under drip irrigation (Ferreres et al., 1982), was related to the surface area shaded by the trees at 1200 h as shown in Fig. 33-4. The data indicate a high degree of microadvection (an orchard with 20% cover had an ET 50% that of a mature orchard) and provide estimates for the irrigation requirements of young almond trees (Ferreres et al., 1982). The factors developed in northern California (Ferreres et al., 1982) were found to be accurate in the San Joaquin Valley (Sharples et al., 1985). This suggests that the data of Fig. 33-4 may be used in similar climates with drip irrigation and even perhaps with other tree species (Renquist, 1987). However, values reported for young apple trees under drip irrigation (Middleton et al., 1979) do not agree with the data of Fig. 33-4. There is an urgent need to increase the number and accuracy of ET determinations in deciduous fruit and nut trees of various ages to resolve some of the issues stated above.

B. Irrigation Scheduling

Developing irrigation regimes requires knowledge of both the timing and amount of water to apply in order to replenish ET losses. The procedures used to schedule irrigations in orchards may be classified into those using soil or plant measurements to determine irrigation timing and those based on a water budget to estimate both depth of application and timing (Goldhamer & Snyder, 1989).

Measurement of soil water status may be done by evaluating the soil matric potential at a given depth with tensiometers, gypsum blocks, or other types of soil matric potential sensors. Tensiometers and gypsum blocks have been used quite often by farmers as indicators of irrigation timing. The threshold reading varies with soil type, crop, and stage of development and with the extent of soil wetting. The trends of a series of readings from two sensors at two different depths usually provide better information as they indicate the direction of water movement, as well as the rate of depletion (Ferreres et al., 1981). Deep soils of medium to fine texture under conventional irrigation methods are better suited for the use of gypsum blocks while tensiometers are more practical under high frequency irrigation and/or in shallow soils of coarse texture (Smith & Fereres, 1988). The major limitation for the use of soil sensors is the spatial variation in soil water properties and the uncertainty of the root distribution in the orchard. Once a representative location has been identified through trial and error, soil matric potential sensors provide an effective means for irrigation scheduling. Klein (1983) showed that the use of tensiometers for peach irrigation reduced irrigation needs from 12 to 23% relative to irrigation scheduling based on E_0 read-

ings. The cause of the savings was that daily orchard ET variations were not detected when weekly coefficients were used with the latter method. When localized high-frequency irrigation is used in orchards, the use of soil water potential or water content sensors is critical (Feres et al., 1981). Use of tree measurements such as leaf ψ for irrigation scheduling is another alternative as discussed in section I.A of this chapter.

The water budget method requires, in addition to orchard ET estimates (section III.A), the determination of the allowable soil water depletion (Smith & Feres, 1988), also referred to as *yield threshold depletion* (Goldhamer & Snyder, 1989). The principles of orchard irrigation were first developed in the deep soils of California's Central Valley (Veihmeyer, 1927; Veihmeyer & Hendrickson, 1949). There, tree roots extend to considerable depth, extracting water from the subsoil as the surface layers are depleted. Under those conditions, a large portion of the root zone may be fully depleted before an irrigation is needed. Thus, the allowable depletion of orchard soils has traditionally been considered quite high (70–80% of the available water capacity of the soil). A consequence of the high depletion values is the large interval between irrigations, typical of surface irrigation practices in valley soils. Evaluation of the allowable depletion requires knowledge of the extent and density of the tree root system, as well as of the soil water characteristics. Such information is not normally available and must be obtained if an accurate water budget is sought. On the other hand, if the irrigation interval is long, it may not be possible to fully replenish the ET losses because of irrigation system or infiltration rate limitations. Thus, it is not uncommon for orchards on deep soils to start the season with a wet profile and to end it with the profile almost totally depleted (Veihmeyer, 1972).

Irrigation scheduling models may be used in orchards (Miyamoto, 1984). However, orchard-to-orchard variation precludes this approach without site-specific calibration (Bethell et al., 1979). It is encouraging, though, that an irrigation scheduling program was successfully operated for over 100 orchardists during several years in an area of diverse topography and microclimate (Bethell et al., 1980). The use of the neutron probe to evaluate soil water depletion (Campbell & Campbell, 1982) is another alternative to the water budget method that has similar limitations to those discussed for other soil water status sensors. It can be used in combination with the water budget method, allowing a specific calibration of every orchard site (Bethell et al., 1980). Under high-frequency methods, declining trends in subsoil water content as measured with the neutron probe suggest insufficient water application.

The only information required to schedule irrigations with high-frequency systems that do not refill the soil water reservoir is orchard ET and irrigation system efficiency (section IV of this chapter). To avoid obtaining such estimates, many high-frequency systems are scheduled on the basis of soil water instruments which may be connected to the system for automatic irrigation when a predetermined soil water level is reached (e.g., Feyen et al., 1985).

C. Effects of Reduced Irrigation on Growth, Development, Yield, and Fruit Quality

Appropriate irrigation scheduling is required to minimize plant water deficits throughout the crop life cycle. In orchards, there are many situations where irrigation applications are insufficient to meet the tree demand, either because the supply of water is limited or because of management-imposed water deficits at certain growth stages. Detecting tree water deficits is now possible by a combination of tree and soil water measurements although limited irrigation does not always induce water stress, particularly when soil water storage is substantial. Tree responses to reduced irrigation are reviewed below with emphasis on yield-determining processes. Salter and Goode (1967) and Uriu and Magness (1967) summarized the older literature, and Landsberg and Jones (1981) thoroughly reviewed the responses of apple trees to water deficits.

1. Growth

As in herbaceous crop plants (Hsiao et al., 1976), the process of expansive growth in fruit trees is very sensitive to water deficits (apple, Landsberg & Jones, 1981; pear, Brun et al., 1985a; almond, Fereres et al., 1981; peach, Chalmers et al., 1983; and pistachio, Goldhamer et al., 1986). The reviews by Salter and Goode (1967) and Uriu and Magness (1967) concluded that shoot growth was the first process to be affected by water stress. Mild water deficits early in the season reduce shoot elongation which takes place during the first few months of the season in deciduous fruit and nut trees. Lötter et al. (1985) found significant differences in apple shoot extension growth between two treatments that had average soil water ψ values of -0.02 and -0.06 MPa, respectively, during the shoot growth phase. Unfortunately, they did not measure leaf ψ . Shoot extension in the spring has been related to water supply conditions late in the previous season. Conditions favoring high water uptake rates until late in the season also promote shoot growth in the following season (Salter & Goode, 1967).

Shoot and trunk thickening may proceed throughout the growing season and are also sensitive to water deficits (see review by Salter & Goode, 1967). There are suggestions that trunk growth is less sensitive to water deficits than shoot extension (e.g., Maggs, 1961 cited by Landsberg & Jones, 1981) although the recovery of trunk growth upon relief of water stress that may occur at any time is probably the cause of such observations. Leaf size is normally less affected by water stress in fruit trees than are both shoot extension and thickening (Landsberg & Jones, 1981; Goldhamer et al., 1986). The cumulative effect of water stress on vegetative growth in deciduous fruit and nut trees is a reduction in tree size (Salter & Goode, 1967).

In addition to shoot elongation, another critical aspect of vegetative growth on tree productivity is shoot initiation. Goldhamer et al. (1987) found that the rate of shoot initiation in pistachio was directly related to the degree of the water deficits imposed; even mild water deprivation resulted in reduced

initiation. In species where the number of fruiting positions per shoot is relatively insensitive to water stress, the number of shoots initiated may be one of the primary yield components affected by deficit irrigation.

Reproductive development interacts with vegetative growth in fruit trees (Chalmers, 1987). Thus, the final effects of water deficits on growth are variable, depending on crop size. In addition to having a relatively large C demand, trees with large fruit numbers may transpire at high rates (Chalmers et al., 1983) and develop low leaf ψ values. In those trees, vegetative growth suffers more when water supply is limited, particularly during the fruit growth periods.

2. Development

Aspects of development that are relevant to fruit and nut production include flower bud formation, floral development, and fruit set. As shown in Fig. 33-1, the formation of flower buds and differentiation of floral organs in deciduous trees generally occurs during the previous season. Water stress during summer and fall affects the initiation and differentiation of flower buds in most species (Uriu & Magness, 1967). In apple, severe drought prevents flower bud formation but moderate water deficits do not appear to have a significant effect (Landsberg & Jones, 1981). Flower bud formation in apricot trees appears to be sensitive to water deficits resulting from the lack of postharvest irrigation (Uriu & Magness, 1967). In some nut tree species—such as almond, walnut, and pistachio—summer water stress that reduces leaf ψ to values between -2.5 and -3.0 MPa does not appear to have a negative effect on flower bud formation per unit shoot length in the following year (Feres & Goldhamer, 1979, 1987, unpublished observations). On the contrary, there are reports suggesting that return bloom of some species increases after trees are subjected to water deficits the previous summer. Chalmers et al. (1985) observed such response in peach under deficit irrigation. Similar effects of increased flowering induced by water stress in the previous season have been observed in pear by Mitchell et al. (1986) and in peach by Larson et al. (1988). Water stress during flower development in deciduous trees is an unlikely event due to minimal tree water requirements at that stage and to the low evaporative demand of the spring. If water deficits are severe enough during the summer to cause premature leaf fall, irrigation after that time is known to promote flowering during the fall, thereby reducing flowering the next spring. Fruit set as a percentage of flower numbers increases as tree water supply improves in apple (Landsberg & Jones, 1981). If water deficits develop immediately after petal fall, fruit set will be substantially reduced (Salter & Goode, 1967). Fruit shedding caused by water stress has been described in pear and apple trees (Uriu & Magness, 1967) but it is seldom observed under field conditions, unless the stress is severe.

3. Fruit Quality

Fruit size is one aspect of fruit quality negatively affected by water stress. The fruit enlargement process is sensitive even to mild tree water deficits

(Landsberg & Jones, 1981; Daniell, 1982). Fruit numbers interact with fruit size, and water deficits reduce fruit size more when fruit numbers are high (Landsberg & Jones, 1981). Brun et al. (1985a) suggested that slower fruit growth early in the season in pear is caused by water deficits during the previous summer.

Eating quality of many pome and stone fruits is enhanced by mild water deficits (e.g., Proebsting et al., 1984; Chalmers et al., 1983). Soluble solids increase and water content decreases in fruits from trees subjected to water deficits (Uriu & Magness, 1967). Mild water deficits also enhance apple color and reduce titratable acidity (Proebsting et al., 1984). Lötter et al. (1985) found that irrigating apple trees when only 15 to 35% of available water was depleted increased the incidence of a number of physiological disorders such as bitter pit, superficial scald, and water core. Landsberg and Jones (1981) discussed other aspects of apple quality as affected by water supply. Fruit disorders in pear, such as cork spot, have been correlated with increased irrigation (Brun et al., 1985b). Sunburn in prune increases under water deficits (Uriu & Magness, 1967).

Nut quality is generally reduced by water deficits. Sunburn in heat-sensitive walnut cultivars increases under water stress (Ramos et al., 1978). Goldhamer et al. (1986) showed a general decrease in nut quality parameters of pistachio subjected to water deficits, including greater unsplit nut production. Interestingly, even severe deficit irrigation did not materially affect kernel filling in pistachio. On the other hand, water deficits are known to affect the kernel-filling process in almond, reducing nut quality.

4. Fruit Yield

Obtaining the highest marketable yield at the lowest possible cost is the primary objective of the orchardist. This objective must be achieved throughout the life of the orchard (at least 15–20 yr). Thus, experiments designed to fully evaluate irrigation strategies should be conducted over a number of years to provide definitive answers. Unfortunately, few long-term experiments on irrigation of fruit trees have occurred in recent decades and we still must rely on earlier work (e.g., Viehmeyer, 1972, 1975). His early experiments with peach, apricot, and apple on deep, fertile soils can now be interpreted to indicate that if trees have access to subsoil moisture, it is possible to achieve maximum yields without irrigating to meet the maximum T demand (Viehmeyer, 1975). In other words, deficit irrigation may not result in reduced T if deep reserves of soil moisture are available for plant uptake. On the other hand, tree water stress can occur if a dry soil profile is irrigated precisely to meet the T demand because of competition between soil absorptive forces and roots for soil moisture.

Debate continues regarding the effects of deficit irrigation on yields. Recent results of Chalmers et al. (1985) suggest that limited irrigation in shallow soils can be a valuable strategy to obtain maximum yields in some peach and pear cultivars. Notwithstanding this regulated deficit irrigation approach, the application of full or nearly full irrigation requirements has resulted in

maximum yields in a number of experiments also conducted recently (Lötter et al., 1985; Brun et al., 1985a; Bethell et al., 1979; Assaf et al., 1984; Layne & Tan, 1984; Goode et al., 1978; Daniell, 1982). There is little doubt that water deficits severe enough to seriously affect any of the yield-determining processes discussed in this section will result in economic losses.

The evaluation of marketable yields requires an assessment of all parameters that have an influence on tree productivity and crop quality. The sensitivity of such parameters to water deficits may be variable and a comprehensive study is needed for full evaluation of the impact of water deficits on tree yield and performance. An example of one such study was conducted in pistachio by Goldhamer et al. (1987) involving 3 yr of deficit irrigation, the summary of which is illustrated in Fig. 33-5. The excellent reputation of pistachio as a drought-resistant tree (Behboudian et al., 1986) contrasts with the sensitivity of yields to moderate water deficits. Studies such as that shown in Fig. 33-5 are needed for other deciduous fruit and nut trees to elucidate their responses to reduced irrigation applications.

5. Irrigation Management Under Limited Water Supply

In situations where water is limited or its supply is purposely regulated (Chalmers et al., 1985), knowledge of tree responses to water deficits may be applied to develop irrigation strategies directed at obtaining maximum marketable yields of orchard crops.

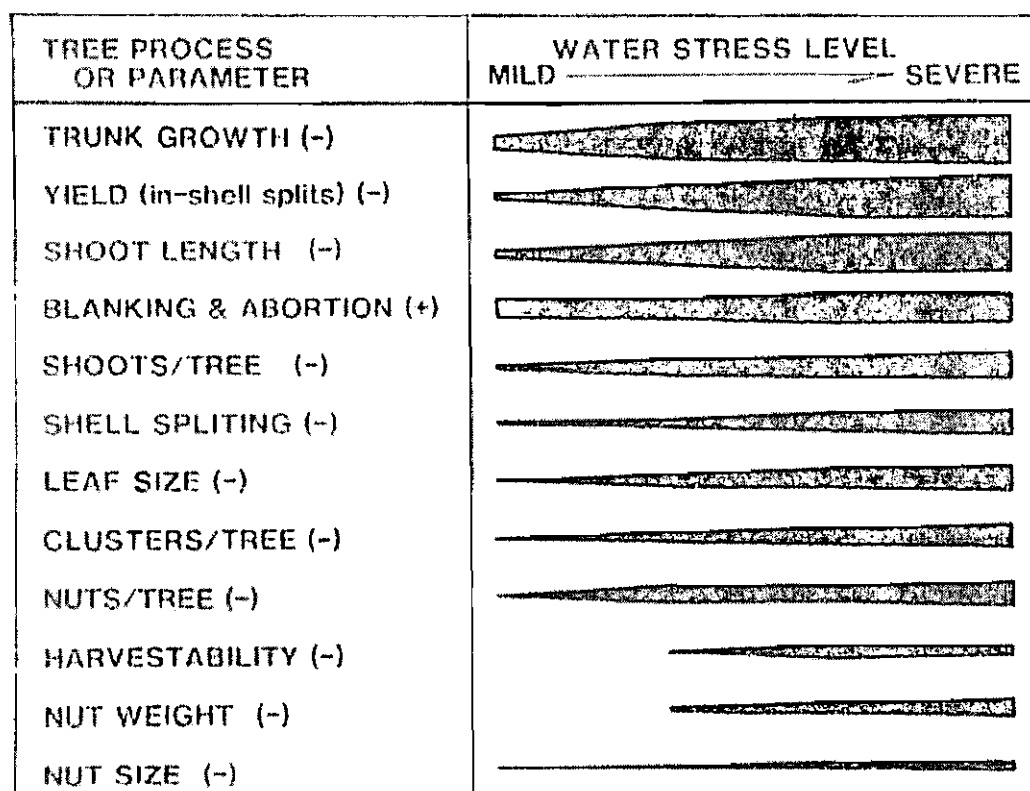


Fig. 33-5. Generalized diagram of the sensitivity to water stress of selected pistachio plant processes and parameters. Widths of the horizontal bars at given stress levels represent the relative magnitudes of the response and were developed by evaluating effects under dryland, 25, 50, and 75% ET relative to 100% ET (dryland illustrated as "severe" stress and 75% ET shown as "mild"). Signs indicate whether water deficits resulted in a decrease (-) or increase (+) in the magnitude of the process or parameter.

As a general principle, water deficits should be avoided at all times during the first few years of the orchard. Canopy development should not be limited by water stress effects on expansive growth as they delay the achievement of maximum orchard yields. Fereres et al. (1981) showed that young almond trees irrigated throughout the season outyielded those where irrigation was cut off 6 wk before the beginning of leaf fall. Minimum pruning and high tree densities (Mitchell & Chalmers, 1982) are additional practices that may be used to shorten the time for establishing a mature orchard.

The water storage capacity of the orchard root zone plays an important role in defining the limited irrigation program. In deep soils, it is desirable to start the season with a fully charged profile and to apply water at a rate below the consumptive use until about harvest. Postharvest irrigation practices are discussed separately below. In shallow soils, it is possible to control growth and tree water status by using high-frequency deficit irrigation. Decreasing the application rate to a small fraction of the tree requirements (about 10–20% in some stages) markedly reduces shoot growth without seriously affecting fruit growth, at least with certain tree species or cultivars. Mitchell and Chalmers (1982) and Mitchell et al. (1984) showed that yields of late-season maturing peach and pear are not affected by deficit irrigation during the shoot growth stage, while pruning and irrigation costs are reduced as compared to fully irrigated trees. This is possible because by the time the shoot growth period in these trees is nearly complete, about 75% of the fruit growth period remains (Chalmers et al., 1985). Thus, full irrigation after the deficit induces compensatory fruit growth, leading to about the same fruit size. Chalmers et al. (1985) indicated that it is possible for the extreme treatments to decrease vegetative growth by three-fourths and irrigation applications by one-third in peach and pear trees without reducing yields or fruit size. The approach outlined above is difficult to use in deep soils as limited irrigation applications do not prevent tree uptake if there is deep moisture available. Precise, controlled water applications are required to induce water stress at the desired stage. Nevertheless, as a general philosophy, the suggestions of Chalmers et al. (1985) deserve attention and more experiments should be conducted with different tree species, cultivars, soils, and irrigation systems to evaluate the feasibility of regulated deficit irrigation.

In deep soils, the use of continuous high-frequency deficit irrigation has proven useful to reduce irrigation requirements. In a 5-yr experiment with peach trees in Winters, CA, applications of 25 to 33% of the ET requirements resulted in the maintenance of leaf photosynthetic rates close to those exhibited by trees that received 100% of the ET requirement (Fig. 33–6). In contrast, the nonirrigated treatment had low photosynthesis throughout the season, even though its leaf ψ had similar values to those of the deficit treatment (Fig. 33–2a; Fereres, Beutel, and Uriu, 1979, unpublished data). The maintenance of higher stomatal conductance and of photosynthesis in the deficit irrigation treatment was associated with substantial water extraction deep in the profile as shown in Fig. 33–7. Subsoil water extraction in the deficit treatment exceeded that of the dryland treatment by more than 25% (Table 33–2). Deficit-drip irrigation, combined with high soil-water storage,

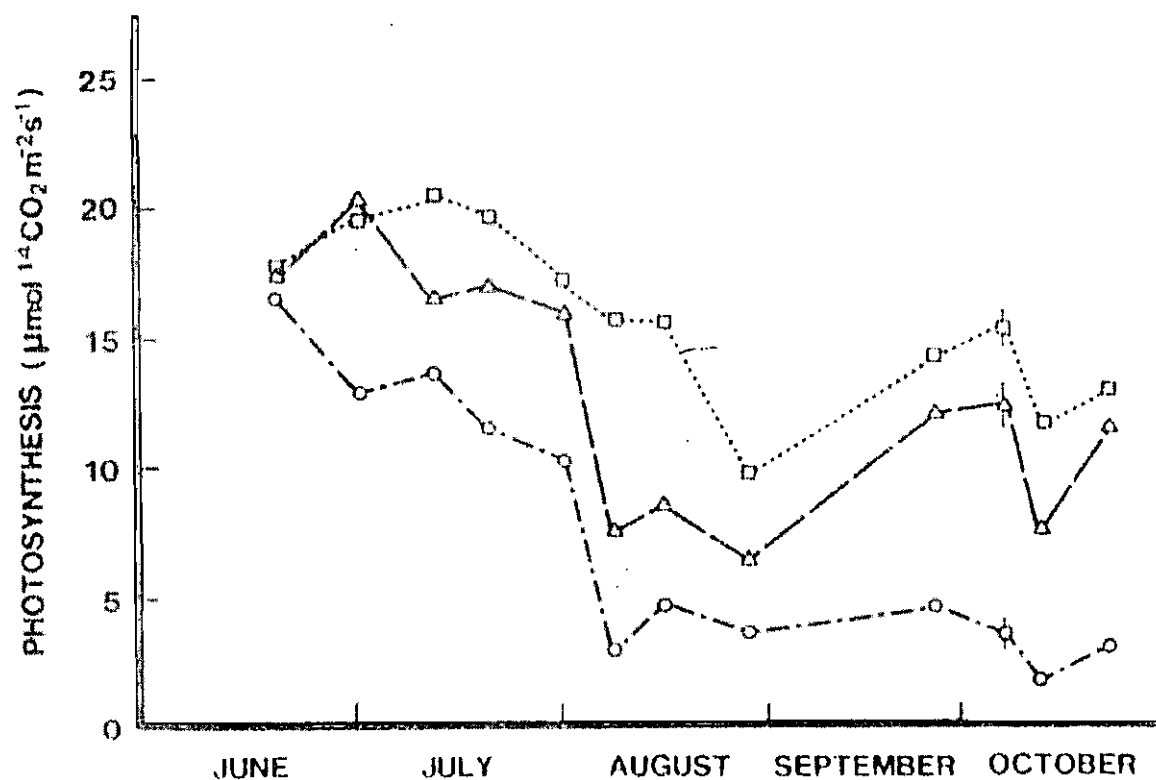


Fig. 33-6. Seasonal course of midday leaf photosynthesis rates for fully irrigated (100% ET, squares), deficit irrigated (33% ET, triangles) and dryland (circles) treatments in peach trees (cv. Suncrest) measured with a C-14 technique in Winters, CA during 1979.

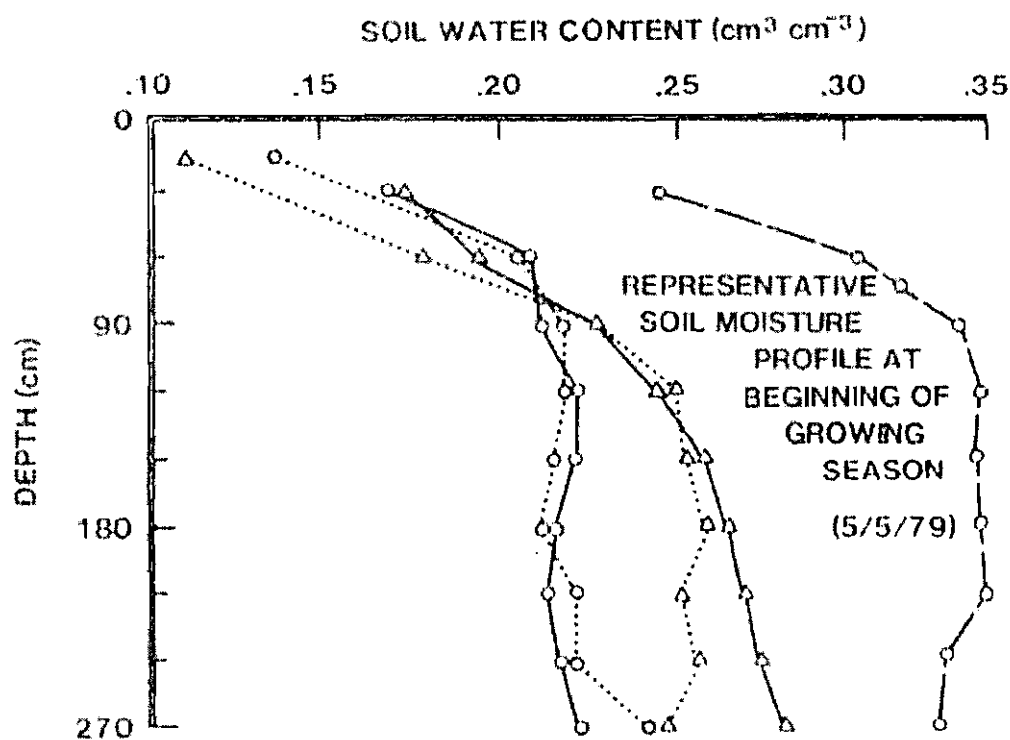


Fig. 33-7. Soil water content as a function of depth at the beginning and end of the 1978 and 1979 growing seasons for dryland (triangles) and deficit-irrigated (25 or 33% ET, circles) peach trees in Winters, CA.

Table 33-2. Evapotranspiration and soil water extraction of peach trees under various irrigation treatments in Winters, CA, for a period between 1 May and 31 Oct. 1979 (Ferreres et al., 1979, unpublished data).

Treatment	Soil water		Evapotranspiration
	Applied water	Extraction	
		mm	
Flood	690	166	856
Drip 100%	501	202	703
Drip 33%	146	321	467
Dryland	--	243	243

kept peach trees functional throughout several seasons and allowed for the complete depletion of soil water reserves. Even though applied water was only 25 to 33% of ET requirements, the seasonal ET of such treatments ended up being 65% of maximum ET because of the substantial contribution of stored soil water.

A general recommendation, already practiced by many orchardists around the world, is to reduce irrigation after harvest. Postharvest irrigation of mature, early season peach trees grown in California was reduced to a single application after 15 June for 3 yr without negative effects on fruit load. However, marketable yields of the second and third years were reduced because of fruit doubling, i.e., two joined fruit per stem (Handley & Johnson, 1986, unpublished data). Phene et al. (1987) showed that in over a 3-yr period, it is possible to end irrigation on pistachio at about 75% of the seasonal water requirement without marketable yield losses. Common irrigation practices in almond and walnut orchards in California's Central Valley result in the development of substantial water deficits during and after harvest. It is not known if, in such cases, additional irrigation would improve yields. Reducing postharvest irrigation may have little or no impact on yields of deciduous fruit and nut trees. However, there is variation among species in their sensitivity to postharvest water stress (Uriu & Magness, 1967) and more research is needed to quantify the stress levels that are acceptable for the various species and situations.

If the reduction in water supply is drastic, severe pruning in peach and pear trees has proven instrumental in tree survival as it prevents the development of severe water deficits that cause tree death (Proebsting & Middleton, 1980).

D. Frost and Climate Control

Overhead sprinkler irrigation may be used for frost control by spraying fruit trees during freezing temperatures (Barfield & Gerber, 1979; Jarrett & Morrow, 1984). Hamer (1986) calculated the water requirements for frost protection by using a heat balance equation that permits the accurate estimation of water needs. Cooling the buds during winter delays bud development until frost probabilities are negligible (Anderson et al., 1973). Such a

technique delays apple bloom by 5 to 15 d in southern England, although the sprinkled buds are more frost sensitive at every stage, probably due to their higher water content (Hamer, 1983).

Climate control by evaporative cooling has been investigated in warm climates in many crops such as pear (Lombard et al., 1966), apple (Unrath and Sneed, 1974), grape (Gilbert et al., 1970), and prune (Henderson, Aldrich & Uriu, 1978, unpublished data). Goode et al. (1979) have shown that overhead irrigation by misting reduces apple tree environmental stress even in temperate regions. Misting in combination with conventional irrigation increased fruit bud production, fruit number, and yield in years of high evaporative demand. Nevertheless, the strict requirements of good quality water, the limited benefits on fruit quality, and the questionable economic feasibility have all prevented widespread application of this technique. Chilling requirements in warm climates may be fully achieved by sprinkling trees during the dormant period (Gilreath & Buchanan, 1981). Erez and Couvillon (1983) reduced bud temperatures by about 3°C during the day, leading to enhanced bud break and to an early and more uniform bloom in nectarine.

E. Irrigation-Disease Relationships

Water management influences the predisposition of deciduous fruit and nut trees to disease infection. Notably, excess soil moisture and poor aeration enhance the probability of root or crown infection by *Phytophthora* spp. in walnut, cherry, avocado (*Persea americana* Mill.), and citrus (MacDonald & Duniway, 1978; Wilcox & Mircetich, 1985; Sterne et al., 1977; Stolzy et al., 1965). While the extent of disease damage depends on interactions between the *Phytophthora* spp., the rootstock, and the behavior of the pathogen propagules, irrigation management strongly influences the latter factor and thus, plays a key role in the longevity and productivity of infected orchards.

Soil water status largely affects the development of *Phytophthora* by enhancing the release and dispersal of zoospores and by creating root conditions favorable for host infection by zoospores (Matheron & Mircetich, 1985). Working with cherry, Wilcox and Mircetich (1985) found that soil water levels near saturation increased the rate of sporangia initiation and zoospore discharge which resulted in severe infection rates by numerous *Phytophthora* spp. Lowering the soil matric ψ to about -2 kPa almost completely eliminated pathogen infection, presumably because of low sporangium formation or failure of the sporangia to discharge zoospores. By flooding the soil for short periods of time to create conditions favorable for zoospore creation and discharging, Wilcox and Mircetich (1985) failed to observe high disease levels, presumably because zoospore mobility was limited by the short flooding duration. Zoospores move most readily in large water-filled soil pores. Excessive moisture may also lead to root changes due to prolonged anoxia that may increase root susceptibility to infection. Indeed, the build-up of ethanol in oak roots because of anaerobic soil conditions resulted

in increased infection by *Armillaria mellea* (Vahl.:Fr.) Kümme s. str. fungus (Wargo & Montgomery, 1983).

The extent of orchard infection due to *Phytophthora* is highly influenced by the species and the rootstock, as well as water management, especially for walnut. With the *Juglans hindsii* (Jeps.) Jeps. rootstock, a susceptible cultivar, infection by *P. cryptogea* Pethybr. & Laff. and *P. citrophthora* (R.E. Sm. & E.H. Sm.) Leonian can be minimized by avoiding prolonged or repeated periods of soil saturation around the trunks (Matheron & Mircetich, 1985). This may require physical or chemical modification of soils to improve infiltration or internal drainage. Avoidance of saturated conditions for prolonged periods can also be accomplished by changing from flood to high-frequency, localized irrigation methods, such as low-volume sprinkler. On the other hand, massive and widespread infection can occur in orchards on *J. hindsii* rootstock infected with *P. citricola* Sawada and *P. cinnamomi* Rands., even if careful water management is practiced. If *Phytophthora* problems are anticipated when planning an orchard, a more resistant rootstock, such as Paradox (*J. hindsii* × *J. regia*), which has proven to be more resistant to several *Phytophthora* species, should be planted.

While *Phytophthora* is commonly enhanced by high soil water levels, deep bark canker is associated with both excessive and inadequate moisture in the root zone of deciduous fruit and nut trees. Irrigating during the winter to supplement chronic deficit irrigation during the summer reduces the extent of active deep bark canker symptoms in mature walnut trees (Teviotdale & Sibbett, 1982). This response is attributed to improved tree vigor.

Another soil-borne fungus that is influenced by water management is *Verticillium dahliae* Kleb. In this case, it's temperature, rather than soil oxygen status, that appears to be the primary factor controlling infection by the pathogen. The infection rate of guayule (*Parthenium argentatum* A. Gray) by *V. Dahliae* is directly related to irrigation frequency; maximum damage occurs with weekly irrigation and least occurs under dryland conditions (Schneider, 1948). This is attributed to the fact that each irrigation reduces soil temperature which enhances disease infection. The temperature influence on plant expression of *V. dahliae* infection was also observed by Wilhelm and Taylor (1965) in olive (*Olea europaea* L.) trees. High midsummer temperatures resulted in recovery from *Verticillium* infection symptoms in the canopy, followed by renewed infection with cooler fall temperatures. They concluded that temperature is a major factor in determining the severity of this wilt due to its effect on the growth rate of the pathogen.

Orchardists with *Verticillium*-infested soils and sensitive tree species can use the experience of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) growers afflicted with this problem as a guide to develop optimal irrigation strategies. Preplant cotton irrigations are recommended to fill the profile, followed by the use of as few heavy irrigations as possible during the season (Rancy, 1973). Frequent, light irrigations that reduce soil temperature should be avoided. A practice emerging among California pistachio growers with high levels of *V. dahliae* in the soil is to apply a heavy winter irrigation and delay the first postleafout irrigation as long as possible. This practice presumably allows

soil temperatures to remain relatively high during the spring—a time when pistachio seems particularly susceptible to infection. It should be noted that withholding water for too long can create tree water deficits that may ultimately affect orchard yield more than the disease.

F. Irrigation-Insect Relationships

Both increases and decreases in insect populations attributed to water management have been observed over a wide range of crops. With herbaceous crops, plant water stress-induced increases in spider mite (*Tetranychus telarius* Koch) populations were found by Hollingsworth and Berry (1982) on peppermint (*Mentha × piperita* L.), Chandler et al. (1979) on corn, and Kattes and Teetes (1978) on sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Tree crops under water stress that manifested increased mite pressures include almond (Youngman & Barnes, 1986; Youngman et al., 1988; Feese & Wilde, 1977), walnut (D.A. Goldhamer, 1986, unpublished data), and peach (D. Handley, 1987, unpublished data). Two hypotheses are usually offered to account for increased mite pressures from deficit irrigation:

1. Since stressed leaves are usually warmer than unstressed leaves due to stomatal control of transpiration, insect development rates are enhanced (van de Urie et al., 1972).
2. Stressed leaves may provide a more nutritious meal that favors insect growth and reproductive success (McNeil & Southwood, 1978). Increased protein synthesis in plants at the onset of leaf wilting may temporarily increase available N to feeding insects (Henckel, 1964).

While irrigation-related plant water stress is usually associated with increased insect problems, numerous cases have been observed where water stress reduced insect pressures on both herbaceous and tree crops, including European red mite on apple (Specht, 1965) and two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae* Koch) on soybean (*Glycine max* L.) (Mellors et al., 1984). Scribner (1978) found that larval growth of a variety of leaf-chewing *Lepidoptera* slowed as leaf water content decreased because of water stress.

The predisposition of tree crops to increased insect damage depends largely on the feeding nature of the insects involved, whether they are larvae or adults. Goldhamer et al. (1986) found that epicarp lesion damage on pistachio nuts, believed to be primarily the result of feeding by adult leaf-footed plant bugs (*Leptoglossus clypealis* Heldemann), was least in trees under severe water stress and greatest in fully irrigated trees. They suggested two possible explanations. One, microclimatic differences in the tree canopies made the stressed tree environment undesirable for the feeding insects. For example, peak canopy temperatures on a midsummer day were 38.2 and 28.9 °C, for dryland and fully irrigated trees, respectively. Thus, when given the choice, flying adult nut-feeding insects preferred the cooler canopy environment of nonstressed trees. The second hypothesis involves the fact that insect wounds apparently trigger the production of substances that destroy nut tissue, and transport of these substances within the nuts depends on con-

centration or hydraulic gradients. Plant water stress may affect the latter, resulting in less movement of wound-related substances and thus, less epicarp lesion damage.

IV. METHODS OF ORCHARD IRRIGATION

Knowledge of tree irrigation requirements and optimal irrigation timing can only be of benefit if water is delivered uniformly through an efficient irrigation system. Tree crops respond more to soil water levels and irrigation scheduling regimes than to the irrigation method. However, there are some effects unique to certain methods, thus the need to briefly review the basic features of orchard irrigation systems. Extensive reviews are available on irrigation system design (ASAE, 1981) and, specifically, on trickle irrigation systems (Nakayama & Bucks, 1986).

A. Surface Irrigation Systems

Traditionally, fruit trees have been irrigated by a surface method (basin, border, or furrow irrigation). The fact that orchards in the past have been established preferentially on relatively good soils with flat topography facilitated the use of surface methods. Most surface methods require high labor inputs. As the number of irrigations determines the seasonal labor needs, irrigating as infrequently as possible is a widespread attitude in orchard surface irrigation.

Basin irrigation is commonly practiced around the world, with basins varying in size from a single tree to over 0.4 ha. Obviously, filling individual tree basins requires substantial labor which can be minimized if an underground pipe network is installed to deliver equal amounts of water to individual basins. Rawlins (1981) designed a low-head bubbler system that performs such a function with high uniformity and minimum labor and energy costs.

Border irrigation requires high instantaneous flow rates for efficient orchard irrigation. Water is normally delivered to border checks through a network of low-head underground pipes and valves. Furrow irrigation can be used under steeper slopes and requires less land grading than the two other surface methods; it also may be used with smaller flow rates and/or low intake rate soils. A number of configurations may be used to increase intake opportunity time (Booher, 1974). Water is delivered to the furrows through siphons over the ditch or through plastic or aluminum gated pipe. Furrow irrigation of orchards can be considered as one form of localized irrigation as it is possible to wet only a fraction (20–40%) of the soil surface.

Surface irrigation systems in orchards already established cannot be upgraded without tree disturbance and thus, are difficult to improve. Recent developments in surface irrigation technology such as precise laser-beam land leveling (Erie & Dedrick, 1979), surge irrigation (Bishop et al., 1981), and fully automated surge irrigation valves may be used to design highly effi-

cient surface irrigation systems for newly developed orchards located on relatively uniform soils of flat topography. The evaluation and improvement of existing systems (Merriam & Keller, 1978; Liss et al., 1984) is a prerequisite for more efficient use of water in existing surface-irrigated orchards.

B. Pressurized Irrigation Systems

Pressurized irrigation systems for orchards include a variety of portable and permanent sprinkler systems—both under-tree and overhead—and microsprinkler systems, as well as drip or trickle systems. Portable aluminum pipes with under-tree sprinklers are seldom used nowadays because of their extremely high labor requirements. Permanent or solid set systems with overhead sprinklers are versatile as they can also be used for frost protection and environmental control. However, for the full coverage of the orchard needed for such applications, the instantaneous flow rate required is several times that needed for irrigation alone. Investments for permanent overhead sprinkler systems are quite high but may be warranted in some areas and with certain crops because they provide the highest possible degree of frost protection (Barfield & Gerber, 1979) and cooling, as well as the possibility of applying agrochemicals directly to the tree foliage.

Permanent, under-tree sprinkler systems should avoid foliage wetting, reducing the risk of diseases in susceptible species (Michailides & Ogawa, 1986). The systems provide some degree of frost protection (1 to 2°C; R. Snyder, 1988, personal communication) but cannot be used for closely spaced orchards or hedgerow plantings.

The maximum possible spacing between sprinklers and laterals in orchard systems is required to reduce investment costs. If frost protection is desired, overhead systems must have high uniformity for full protection. If this form of frost protection is not important, full-coverage uniformity may be partially sacrificed in view of the success of high-frequency localized irrigation systems (see below). In any case, uniform distribution above the trees does not ensure uniform infiltration as the trees act as water collectors and the water is conveyed through the limbs to specific points at the ground surface.

A large proportion of agricultural lands irrigated by localized irrigation methods is devoted to deciduous fruit and nut trees. The cost of a localized system (drip and microsprinklers) is directly proportional to the number of emission points per unit ground surface, which is a minimum under the usual spacings of fruit trees (Feres et al., 1978). A major advantage of the localized methods in orchard irrigation is related to the water savings potential during the first few years of the orchard (Middleton et al., 1979; Feres et al., 1982). The savings have been estimated to range between 3300 mm for an almond orchard (Feres et al., 1982) to over 6000 mm for an apple orchard compared to a full-coverage sprinkler system that maintained a cover crop (Middleton et al., 1979). Localized irrigation systems include drippers as well as a variety of microsprinklers which range from 10 to 200 L/h in flow rates and from 1 to 8 m diam. of the wetted area (Vermeiren & Jobling, 1983).

The fact that crop responses to drip irrigation were initially positive, despite partial wetting of the root system, generated numerous research efforts aimed at evaluating the minimum fraction of the root system that could be watered for optimum crop performance under localized irrigation (e.g., Black & West, 1974). Such experiments conducted under controlled conditions have shown qualitatively that T rates may not be limited by partial wetting of the root zone in apple (Black & West, 1974) and peach (Tan & Buttery, 1982). The issue has not been resolved for all species and situations although field experience has shown that wetting 20 to 30% of the potential root zone of mature deciduous trees appears sufficient for maximum production, provided enough water is applied to meet the ET demand (Henderson & Fereres, 1981).

Localized irrigation systems allow for the precise control of tree water status in areas of low rainfall and in shallow, marginal soils. As an extreme case, leaf ψ of almond trees dropped from -1.5 to -3.0 MPa in 4 d when the root system was restricted to the area wetted by two emitters (Fereres et al., 1981). A number of experiments with apple trees on relatively shallow soils (Evans & Proebsting, 1985) have shown that even though water is applied at rates sufficient to meet the tree demand, leaf ψ is lower than that observed on trees under full coverage irrigation (sprinkler and furrow). The mild water stress, presumably attributed to higher root zone resistance due to the limited wetting, induces higher soluble solids in the fruits, early flowering in young trees, and sometimes, higher cumulative apple yields in the first few years of the orchard (Evans & Proebsting, 1985). Such differential responses due to the irrigation method have not been documented for other deciduous fruit or nut tree species, although they are likely to occur when drip irrigation is used on marginal soils that restrict root development beyond the zone wetted by the emitters (Chalmers et al., 1985). Other methods could be used to impose similar mild water stress patterns although their management would be difficult.

Use of microsprinklers has become widespread in recent years for irrigation of deciduous fruit and nut orchards. Major advantages of microsprinklers over conventional drip systems include less clogging, lower maintenance requirements, larger wetted surface areas from one emission point, better weed control due to less frequent applications, and the fact that it is easier to identify the initial stages of emitter clogging. Direct E losses from microsprinklers amount to only a few percent of applied water (Goldhamer & Cantrell, 1982) and are not a significant disadvantage of this method. Poor surface distribution uniformity within the wetted pattern (Post et al., 1986) of most microsprinklers does not result in equally poor subsurface soil water distribution; lateral movement and redistribution of water substantially improve root zone moisture uniformity (Goldhamer, 1985a).

In recent years, it has been common to change irrigation systems from full coverage surface or sprinkler to localized irrigation. Concern is usually expressed about the possibility that stress may develop before the root system adapts to the new, localized wetting pattern. Evidence gathered so far (Bielorai et al., 1985) suggests that, in most cases, the conversion may be

made without development of a significant stress in the converted orchard, even in high evaporative demand periods.

The method of irrigation interacts with the vegetation management program of the orchard. Fischer et al. (1986) showed that the effectiveness of preemergence herbicides is directly related to irrigation frequency, and thus, to the irrigation method. Although high-frequency drip systems result in weed proliferation that is generally limited to the wetted surface areas, the weeds are more difficult to control. Strip weed control is needed for drip irrigation, in part, to facilitate system surveillance. Permanent levees are desirable in surface irrigation but can interfere with tillage operations. A cover crop may be used for full coverage sprinkler and border irrigation but may not be suited for furrow or localized irrigation systems.

REFERENCES

- American Society of Agricultural Engineers. 1981. Design and operation of farm irrigation systems. Monogr. 3. ASAE, St. Joseph, MI.
- Anderson, J.L., E.A. Richardson, G.L. Ashcroft, J. Keller, J. Alfaro, G. Hanson, and R.E. Griffin. 1973. Reducing freeze damage to fruit by overhead sprinkling. *Utah Sci.* (December) 1973:108-109.
- Assaf, R., E. Levin, and B. Bravdo. 1984. Effect of drip irrigation on the yield and quality of "Golden Delicious and Jonathan apples." *J. Hortic. Sci.* 59:493-499.
- Atkinson, D. 1980. The distribution and effectiveness of the roots of tree crops. *Hortic. Rev.* 2:424-490.
- Barfield, B.J., and J.F. Gerber. 1979. Systems for reducing environmental stress. p. 13-21. *In* B.J. Barfield et al. (ed.) *Modifications of the aerial environment of crops*. ASAE, No. 2.
- Bates, L.M., and A.E. Hall. 1981. Stomatal closure with soil water depletion not associated with changes in bulk leaf water status. *Oecologia* 50:62-65.
- Behboudian, M.H., R.R. Walker, and E. Törökfalvy. 1986. Effects of water stress and salinity on photosynthesis of pistachio. *Sci. Hortic.* 29:251-261.
- Bethel, R., E. Fereres, R. Buchner, and B. Fitzpatrick. 1979. Water conservation and management for foothill orchards. *Calif. Agric.* 33:7-10.
- Bethel, R., E. Fereres, R. Buchner, and R. Mansfield. 1980. Irrigation management for the Sierra Nevada foothills of California. Final rep. to U.S. Bur. Reclam. Univ. California Coop. Ext., Placerville.
- Beukes, D.J., and H.W. Weber. 1982. The effects of irrigation at different soil water levels on the water use characteristics of apple trees. *J. Hortic. Sci.* 57:383-391.
- Bielorai, H., S. Dasberg, and Y. Erner. 1985. Long-term effects of partial wetting in a citrus orchard. p. 568-573. *In* Proc. 3rd Int. Drip/Trickle Irrig. Congr., Vol. 2, Fresno, CA, November.
- Bishop, A.A., W.R. Walker, N.L. Allen, and G.J. Poole. 1981. Furrow advance rates under surge flow systems. *J. Irrig. Drain Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 107:257-264.
- Black, J., P.O. Mitchel, and P. Newgreen. 1977. Optimum irrigation for young trickle irrigated peach trees. *Austr. J. Agric. Anim. Husb.* 17:342-345.
- Black, J., and D. West. 1974. Water uptake by an apple tree with various proportion of the root systems supply with water. p. 432-436. *In* Proc. 2nd Int. Drip Irrig. Congr., San Diego, CA, July.
- Booher, L.J. 1974. Surface irrigation. FAO, Rome.
- Brough, D.W., H.G. Jones, and J. Grace. 1986. Diurnal changes in water content of the apple trees as influenced by irrigation. *Plant Cell Environ.* 9:1-7.
- Brun, C.A., J.T. Raese, and E.A. Stahly. 1985a. Seasonal response of "Anjou" pear trees to different irrigation regimes. I. Soil moisture, water relations, tree and fruit growth. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 110:830-834.

- Brun, C.A., J.T. Raese, and E.A. Stahly. 1985b. Seasonal response of "Anjou" pear trees to different irrigation regimes. II. Mineral composition of fruit and leaves, fruit disorders, and fruit set. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 110:835-840.
- Campbell, G.S., and M.D. Campbell. 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: Theory and practice. p. 25-42. *In* Daniel Hillel (ed.) *Advances in irrigation*. Vol. 1. Academic Press, New York.
- Castel, J.R., and E. Fereres. 1982. Responses of young almond trees to two drought periods in the field. *J. Hortic. Sci.* 57:175-187.
- Chalmers, D.J. 1987. Opportunities for improving crop yields through research—A physiological perspective. p. 1-8. *In* 4th Austr. Agron. Conf. Proc. La Trobe Univ., Melbourne.
- Chalmers, D.J., P.D. Mitchell, and P.H. Jerie. 1985. The relation between irrigation, growth, and productivity of peach trees. *Acta Hortic.* 173:283-288.
- Chalmers, D.J., K.A. Olsson, and T.R. Jones. 1983. Water relations of peach trees and orchards. p. 197-232. *In* T.T. Kozłowski (ed.) *Water deficits and plant growth*. Vol. 3. Academic Press, New York.
- Chalmers, D.J., and B. van den Ende. 1975. Productivity of peach trees: Factors affecting dry-weight distribution during tree growth. *Ann. Bot.* 39:423-432.
- Chandler, L.D., T.L. Archer, C.R. Ward, and W.M. Lyler. 1979. Influences of irrigation practices on spider mite densities on field corn. *Environ. Entomol.* 8:196-201.
- Daniell, J.W. 1982. Effect of trickle irrigation on the growth and yield of "Loring" peach trees. *J. Hortic. Sci.* 57:393-399.
- DeJong, T.M. 1986. Effects of reproductive and vegetative sink activity on leaf conductance and water potential in "Prunus persica" L. Batsch. *Sci. Hortic. (Amsterdam)* 29:131-137.
- Doorenbos, J., and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. 24 (revised). FAO, Rome.
- Erez, A., and G.A. Couvillon. 1983. Evaporative cooling to improve rest breaking of nectarine buds by counteracting high daytime temperatures. *HortScience* 18:480-481.
- Erie, L.J., and A.R. Dedrick. 1979. Level-basin irrigation: A method for conserving water and labor. *Farmers' Bull.* 2261:24.
- Evans, R.G., and E.L. Proebsting. 1985. Response of red delicious apples to trickle irrigation. p. 231-239. *In* Proc. 3rd Int. Drip/Trickle Irrig. Congr. Vol. 1, Fresno, CA. November.
- Feese, H., and G. Wilde. 1977. Factors affecting survival and reproduction of the Banks grass mite, *Oligonychus pratensis*. *Environ. Entomol.* 6:53-56.
- Fereres, E. 1984. Variability in adaptive mechanisms to water deficits in annual and perennial crop plants. *Bull. Soc. Bot. Fr. Actual Bot.* 131:17-32.
- Fereres, E. 1987. Responses to water deficits in relation to breeding for drought resistance. p. 253-273. *In* J.P. Srivastava (ed.) *Drought tolerance in winter cereals*. John Wiley and Sons, New York.
- Fereres, E., T.M. Aldrich, H. Schulbach, and D.A. Martinich. 1981. Responses of young almond trees to late-season drought. *Calif. Agric.* 35(7, 8):11-12.
- Fereres, E., G. Cruz-Romero, G.J. Hoffman, and S.L. Rawlins. 1979. Recovery of orange trees following severe water stress. *J. Appl. Ecol.* 16:833-842.
- Fereres, E., D.A. Martinich, T.M. Aldrich, J.R. Castel, E. Holzapfel, and H. Schulbach. 1982. Drip irrigation saves money in young almond orchards. *Calif. Agric.* 36:12-13.
- Fereres, E., and I. Puech. 1981. Irrigation management program. Univ. Calif. Coop. Ext. Serv. and Calif. Dep. Water Resour. 1981. Irrigation scheduling guide. California Dep. Water Resour., Sacramento, CA.
- Fereres, E., A.D. Reed, J.L. Meyer, F.K. Aljibury, and A.W. Marsh. 1978. Irrigation costs. Univ. Calif. Div. Agric. Sci. Leaflet 2875.
- Feyen, J., D. Crabbé, N. Kihupi, and P. Michels. 1985. Irrigation timing through micro-computer controlled tensiometers. p. 773-781. *In* Proc. 3rd Int. Drip/Trickle Irrig. Congr. Vol. 2, Fresno, CA. November.
- Fischer, B.B., D.A. Goldhamer, T. Babb, and R. Kjelgren. 1986. Weed control under drip and low-volume sprinkler irrigation. *Calif. Agric.* 39(11, 12):24-25.
- Garnier, E., and A. Berger. 1985. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *J. Hortic. Sci.* 60:47-56.
- Garnier, E., and A. Berger. 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *J. Appl. Ecol.* 23:193-209.
- Gilbert, D.E., J.L. Meyer, J.J. Kissler, P.D. Latine, and C.V. Carlson. 1970. Evaporative cooling of vineyards. *Calif. Agric.* 24:12-14.

- Gilreath, P.R., and D.W. Buchanan. 1981. Floral and vegetative bud development of "Sungold" and "Sunlite" nectarine as influenced by evaporative cooling by overhead sprinkling during rest. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 106:321-324.
- Goldhamer, D.A., and R. Cantrell. 1982. Evaporative spray losses from low volume sprinklers. *Univ. Calif. Davis. Soil Water Newsl.* 50:3-5.
- Goldhamer, D.A., R.K. Kjelgren, R. Beede, L. Williams, J.M. Moore, J. Lane, G. Weinberger, and J. Menczes. 1985b. Water use requirements of pistachio trees and response to water stress. *Calif. Pistachio Ind. Annu. Rep.* 1984-85:85-92.
- Goldhamer, D.A., R.K. Kjelgren, J.M. Moore, and J. Lane. 1985a. Low volume sprinkler surface and subsurface distribution uniformity. p. 851-858. *In Proc. 3rd Int. Drip/Trickle Irrig. Congr.* Vol. 2, Fresno, CA. November.
- Goldhamer, D.A., B.C. Phene, R. Beede, L. Scherlin, J. Brazil, R.K. Kjelgren, and D. Rose. 1986. Water management studies of pistachio: I. Tree performance after two years of sustained deficit irrigation. *Calif. Pistachio Ind. Annu. Rep.* 1985-86:104-112.
- Goldhamer, D.A., B.C. Phene, R. Beede, L. Scherlin, S. Mahan, and D. Rose. 1987. Effects of sustained deficit irrigation on pistachio tree performance. *Calif. Pistachio Ind. Annu. Rep.* 1986-87:61-66.
- Goldhamer, D.A., R.S. Snyder (ed.). 1989. Irrigation scheduling. Univ. California, Berkeley. Leaflet 21454.
- Goode, J.E., and K.H. Higgs. 1973. Water, osmotic and pressure potential relationships in apple leaves. *J. Hortic. Sci.* 48:202-215.
- Goode, J.E., K.H. Higgs, and K.J. Hyrycz. 1978. Nitrogen and water effects on the nutrition, growth, crop yield and fruit quality of orchard-grown Cox's Orane Pippin apple trees. *J. Hortic. Sci.* 53:295-306.
- Goode, J.E., K.H. Higgs, and K.J. Hyrycz. 1979. Effects of water stress control in apple trees by misting. *J. Hortic. Sci.* 54:1-11.
- Hamer, P.J.C. 1983. Evaporative cooling of apple buds: The effect of timing of water application on bud development and frost resistance of the cv. Cox's Orange Pippin. *J. Hortic. Sci.* 58:153-159.
- Hamer, P.J.C. 1986. The heat balance of apple buds and blossoms. *Agric. For. Meteorol.* 37:159-174.
- Henckel, P.A. 1964. Physiology of plants under drought. *Annu. Res. Plant Physiol.* 15:363-386.
- Henderson, D., and E. Fereres. 1981. Crop responses to drip irrigation. p. 6-9. *In Drip irrigation management.* Univ. California Div. Agric. Sci. Leaflet 21259.
- Hollingsworth, C.S., and R.E. Berry. 1982. Twospotted spider mite (Acari: Tetranychidae) in peppermint: Population dynamics and influence of cultural practices. *Environ. Entomol.* 11:1280-1284.
- Hsiao, T.C., and E. Acevedo. 1974. Plant responses to water deficits, water use efficiency and drought resistance. *Agric. Meteorol.* 14:59-84.
- Hsiao, T.C., E. Acevedo, E. Fereres, and D.W. Henderson. 1976. Water stress, growth and osmotic adjustment. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 273:479-500.
- Idso, S.B., R.D. Jackson, P.J. Pinter, R.J. Reginato, and J.L. Hatfield. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24:45.
- Jarrett, A.R., and C.T. Morrow. 1984. Distribution of frost protection water applied to apple trees during bud and leaf development. *Trans. ASAE* 27:89-92, 98.
- Jarvis, P.G. 1981. Stomatal conductance, gaseous exchange and transpiration. p. 175-204. *In J. Grace et al. (ed.) Plants and their atmospheric environment.* Blackwells, Oxford.
- Jarvis, P.G. 1985. Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: The omega factor. *Acta Hortic.* 171:187-205.
- Jarvis, P.G., and J.I.L. Morison. 1981. The control of transpiration and photosynthesis by the stomata. p. 247-279. *In P.G. Jarvis and T.A. Mansfield (ed.) Stomatal physiology,* Cambridge Univ. Press, England.
- Jones, H.G., and I.G. Cumming. 1984. Variation of leaf conductance and leaf water potential in apple orchards. *J. Hortic. Sci.* 59:329-336.
- Jones, H.G., A.N. Lakso, and J.P. Syvertsen. 1985. Physiological control of water status in temperate and subtropical fruit trees. *Hortic. Rev.* 7:301-344.
- Jones, H.G., M.T. Luton, K.H. Higgs, and P.J.C. Hamer. 1983. Experimental control of water status in an apple orchard. *J. Hortic. Sci.* 58:301-316.
- Kuttas, D.H., and G.L. Teetes. 1978. Selected factors influencing the abundance of Banks grass mite in sorghum. *Texas Agric. Exp. Stn. Bull.* 1186.

- Klein, I. 1983. Drip irrigation based on soil matric potential conserves water in peach and grape. *HortScience* 18:942-944.
- Klepper, B. 1968. Diurnal pattern of water potential in woody plants. *Plant Physiol.* 43:1931-1934.
- Klepper, B., V.D. Browing, H.M. Taylor. 1971. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiol.* 48:683-685.
- Lakso, A.N. 1979. Seasonal changes in stomata response to leaf water potential in apple. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 104:58-60.
- Landsberg, J.J., and H.G. Jones. 1981. Apple orchards. p. 419-469. *In* T.T. Kozlowski (ed.) *Water deficits and plant growth*. Vol. VI. Academic Press, New York.
- Larson, K.D., T.M. DeJong, and R.S. Johnson. 1988. Physiological and growth responses of mature peach trees to postharvest water stress. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 113:296-300.
- Layne, R.E.C., and C.S. Tan. 1984. Long-term influence of irrigation and tree density on growth, survival and production of peach. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 109:795-799.
- Levin, I., R. Assaf, and B. Bravdo. 1972. Effect of irrigation treatment for apple trees on water uptake from different soil layers. *J. Am. Hortic. Sci.* 97:521-526.
- Liss, H.J., B.A. Faber, and E. Fereres. 1984. A survey of irrigation scheduling services in five California countries. Calif. Dep. Water Resour. Final Rep. B54104. Sacramento.
- Lombard, P.B., P.H. Westigard, and D. Carpenter. 1966. Overhead sprinkler system for environmental control and pesticide application in pear orchards. *HortScience* 1:95-96.
- Lötter, J.V., D.J. Beukes, and H.W. Weber. 1985. Growth and quality of apples as affected by different irrigation treatments. *J. Hortic. Sci.* 60:181-192.
- MacDonald, J.D., and J.M. Duniway. 1978. Temperature and water stress effects on sporangium viability and zoospore discharge in *Phytophthora cryptogea* and *P. megasperma*. *Phytopathology* 68:1449-1455.
- Matheron, M.E., and S.M. Mircetich. 1985. Influence of flooding duration on development of *Phytophthora* root and crown rot of *Juglans hindsii* and Paradox walnut rootstocks. *Phytopathology* 75:973-976.
- McNeil, S., and T.R.E. Southwood. 1978. The role of nitrogen in the development of insect/plant relationships. p. 77-79. *In* J. Harbone (ed.) *Biochemical aspects of plant and animal co-evolution*. Academic Press, London.
- Mellors, W.K., A. Allegro, and A.N. Hsu. 1984. Effects of carbofuran and water stress on growth of soybean plants and twospotted mite (Acari: Tetranychidae) populations under greenhouse conditions. *Environ. Entomol.* 13:561-567.
- Merriam, J.L., and J. Keller. 1978. Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Agric. Irrig. Eng. Dept. Utah State Univ., Logan.
- Michailides, T.J., and J.M. Ogawa. 1986. Sources of inoculum, epidemiology, and control of *Botryosphaeria* shoot and panicle blight of pistachio. Calif. Pistachio Ind. Ann. Rep. 1985-86:87-91.
- Middleton, J.E., E.L. Proebsting, and S. Roberts. 1979. Apple orchard irrigation by trickle and sprinkler. *Trans. ASAE* 22:582.
- Mitchell, P.D., and D.J. Chalmers. 1982. The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107:853-856.
- Mitchell, P.D., D.J. Chalmers, P.H. Jerie, and G. Burge. 1986. The use of initial withholding of irrigation and tree spacing to enhance the effect of regulated deficit irrigation on pear trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 111:858-861.
- Mitchell, P.D., P.H. Jerie, and D.J. Chalmers. 1984. The effect of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 109:604-606.
- Miyamoto, S. 1983. Consumptive water use of irrigated pecans. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 108:676-681.
- Miyamoto, S. 1984. A model for scheduling pecan irrigation with microcomputers. *Trans. ASAE* 27:456-463.
- Monteith, J.L. 1981. Coupling of plants to the atmosphere. p. 1-29. *In* J. Grace et al. (ed.) *Plants and their atmospheric environment*. Blackwell Scientific Publ., Oxford.
- Nakayama, F.S., and D.A. Bucks (ed.) 1986. Trickle irrigation for crop production. Design, operation and management. Development in agricultural engineering. No. 9. Elsevier, New York.
- Natali, S., C. Xiloyannis, and M. Mugano. 1985. Water consumption in high density peach trees. *Acta Hortic.* 173:413-420.
- Olsson, K.A., and F.L. Milthorpe. 1983. Diurnal and spatial variation in leaf water potential and leaf conductance of irrigated peach trees. *Aust. J. Plant. Physiol.* 10:291-298.

- Perez, J., R.G. Evans, and E.L. Proebsting. 1984. Leaf water potentials for management of high frequency irrigation on apples. *Trans. ASAE* 27:437-442.
- Pheng, B.C., D.A. Goldhamer, J. Menezes, R. Beede, G. Weinberger, and Z. Cervantes. 1987. Response of pistachio trees to three consecutive years of irrigation cut off. p. 67-70. *Annu. Rep. Calif. Pistachio Ind.*
- Post, S.E.C., D.E. Peck, R.A. Brendler, N.J. Sakovich, and L. Waddle. 1986. Evaluation of low flow sprinklers. *Calif. Agric.* 40:27-29.
- Proebsting, E.L., S.R. Drake, and R.G. Evans. 1984. Irrigation management, fruit quality and storage life of apples. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 109:229-232.
- Proebsting, E.L., and J.E. Middleton. 1980. The behavior of peach and pear trees under extreme drought stress. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 105:380-385.
- Proebsting, E.L., J.E. Middleton, and M.O. Mahan. 1981. Performance of bearing cherry and prune trees under very low irrigation rates. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 106:243-246.
- Ramos, D.E., L.C. Brown, K. Uriu, and B. Marangoni. 1978. Water stress affects size and quality of walnuts. *Calif. Agric.* 32:5-6.
- Raney, C.D. 1973. Cultural control. p. 98-104. *In* C.D. Raney (ed.) *Verticillium wilt of cotton*. USDA Publ. ARS-S-14.
- Rawlins, S.L. 1981. Other methods of localized irrigation. p. 33-35. *In* E. Fereres (ed.) *Drip irrigation management*. Univ. Calif., Leaflet 21259.
- Renquist, R. 1987. Evapotranspiration calculations for young peach trees and growth responses to irrigation amount and frequency. *HortScience* 22:221-223.
- Ritchie, G.A., and T.M. Hinkley. 1975. The pressure chamber as an instrument for ecological research. p. 165-254. *In* J.B. Cragg (ed.) *Advances in ecological research*. Vol. 12. Academic Press, London.
- Salter, P.J., and J.E. Goode. 1967. Crop responses to water at different stages of growth. *Commonw. Agric. Bur. Res. Rev.* No. 2. East Malling, England.
- Schneider, H. 1948. Susceptibility of quail to *Verticillium* wilt and influence of soil temperature and moisture on development on infection. *J. Agric. Res.* 76:129-143.
- Schulze, E.D. 1982. Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations. p. 615-676. *In* O.L. Lange et al. (ed.) *Encyclopedia of plant physiology*. New series, Vol. 12B.
- Schulze, E.D. 1986. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 37:247-274.
- Schulze, E.D., and A.E. Hall. 1982. Stomatal responses, water loss and CO₂ assimilation rates of plants in contrasting environments. p. 181-230. *In* O.L. Lange et al. (ed.) *Encyclopedia of plant physiology*. New series, Vol. 12B.
- Schulze, E.D., O.L. Lange, U. Buschbom, L. Kappen, and M. Evenari. 1972. Stomatal responses to changes in humidity in plants growing in the desert. *Planta* 108:259-270.
- Scribner, J.M. 1978. The effects of larval feeding specialization and plant growth form upon the consumption and utilization of plant biomass and nitrogen: An ecological consideration. *Entomol. Exp. Appl.* 24:694-710.
- Sharples, R.A., D.E. Rolston, J.W. Biggar, and H.I. Nightengale. 1985. Evapotranspiration and soil water balances of young trickle-irrigated almond trees. p. 792-797. *In* Proc. 3rd Int. Drip/Trickle Irrig. Congr., Vol. 2, Fresno, CA, November.
- Sinclair, T.R., and M.M. Ludlow. 1985. Who taught plants thermodynamics? The unfulfilled potential of plant water potential. *Aust. J. Plant Physiol.* 12:213-217.
- Smart, R.E., and H.D. Barrs. 1973. The effect of environmental and irrigation interval on leaf water potential of four horticultural species. *Agric. Meteorol.* 12:332-346.
- Smith, M., and E. Fereres. 1988. Irrigation programming. *FAO Irrig. Drain. Pap.* FAO, Rome. (In press.)
- Snyder, R.L., W.O. Pruitt, and D.A. Shaw. 1987. Determining daily reference evapotranspiration (ET₀). Univ. California Coop. Ext. Div. Agric. Nat. Resour. Leaflet 21426.
- Specht, H.B. 1965. Effect of water-stress on the reproduction of European red mite *Panonychus ulmi* (Koch) on young apple trees. *Can. Entomol.* 97:82-85.
- Sterne, R.E., G.A. Zentmyer, and M.R. Kaufman. 1977. The influence of matric potential, soil texture, and soil amendment on root disease caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Phytopathology* 67:1495-1500.
- Stelzy, L.H., J. Letey, L.J. Klotz, and C.K. Labanouskas. 1965. Water and aeration as factors in root decay of *Citrus sinensis*. *Phytopathology* 55:270-275.
- Syvertsen, J.P. 1985. Integration of water stress in fruit trees. *HortScience* 20:1039-1043.

- Fan, C.S., and B.R. Buttery. 1982. The effect of soil moisture stress to various fractions of the root system on transpiration, photosynthesis, and internal water relations of peach seedlings. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107:845-849.
- Taylor, H.M. 1983. Managing root systems for efficient water use: An overview. p. 87-113. *In* H.M. Taylor et al. (ed.) *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Teviotdale, B.L., and G.S. Sibbett. 1982. Midwinter irrigation can reduce deep bark canker of walnuts. *Calif. Agric.* 36(5, 6):6-7.
- Turner, N.C. 1986. Crop water deficits: A decade of progress. *Adv. Agron.* 59:1-51.
- Unrath, C.R., and R.E. Sneed. 1974. Evaporative cooling on "Delicious" apples—the economic feasibility of reducing environmental heat stress. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 99:372-375.
- Uriu, K., and J.R. Magness. 1967. Deciduous tree fruit and nuts. *In* R.M. Hagan et al. (ed.) *Irrigation of agricultural lands*. Agronomy 11:686-703.
- van de Urie, M., J.A. McMutry, and C.B. Huffaker. 1972. Ecology of tetranychid mites and their natural enemies: A review. III. Biology, ecology, and pest status, and host-plant relations of tetranychids. *Hilgardia* 41:343-432.
- Veihmeyer, F.J. 1927. Some factors affecting the irrigation requirements of deciduous orchards. *Hilgardia* 2:125-284.
- Veihmeyer, F.J. 1972. The availability of soil moisture to plants: Results of empirical experiments with fruit trees. *Soil Sci.* 114:268-294.
- Veihmeyer, F.J. 1975. The growth of fruit trees in response to different soil moisture conditions measured by widths of annual rings, and other means. *Soil Sci.* 119:448-460.
- Veihmeyer, F.J., and A.H. Hendrickson. 1949. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soil. *Soil Sci.* 68:75-94.
- Vermeiren, L., and G.A. Jobling. 1983. Localized irrigation. *FAO Irrig. Drain. Pap.* 36. FAO, Rome.
- Wargo, P.M., and M.E. Montgomery. 1983. Colonization by *Armillaria mellea* and *Agrilus bilineatus* of oaks injected with ethanol. *For. Sci.* 29:848-857.
- Wiersum, L.K., and K. Harmany. 1983. Changes in the water permeability of roots of some trees during drought stress and recovery, as related to problems of growth in an urban environment. *Plant Soil* 75:443-448.
- Wilcox, W.F., and S.M. Mircetich. 1985. Effects of flooding duration on the development of *Phytophthora* root and crown rots of cherry. *Phytopathology* 75:1451-1455.
- Wilhelm, S., and J.B. Taylor. 1965. Control of verticillium wilt of olive through natural recovery and resistance. *Phytopathology* 55:310-316.
- Worthington, J.W., M.J. McFarland, and P. Radrigue. 1984. Water requirements of peach as recorded by weighing lysimeters. *HortScience* 19:90-91.
- Youngman, R.R., and M.M. Barnes. 1986. Interaction of spider mites (Acari: Tetranychidae) and water stress on gas-exchange rates and water potential of almond leaves. *Environ. Entomol.* 15:594-600.
- Youngman, R.R., J.P. Sanderson, and M.M. Barnes. 1988. Life history parameters of *Tetranychus pacificus* McGregor (Acari: Tetranychidae) on almonds under differential water stress. *Environ. Entomol.* 17:488-495.

Yield Responses of a Mature Olive Orchard to Water Deficits

Alfonso Moriana and Francisco Orgaz

IAS-CSIC, PO Box 4084, 14080 Cordoba, Spain

Miguel Pastor

CIFA Alameda del Obispo, PO Box 4240, 14004 Cordoba, Spain

Elias Fereres

IAS-CSIC and University of Cordoba, PO Box 4084, 14080 Cordoba, Spain

ADDITIONAL INDEX WORDS. *Olea europaea*, crop water production function, irrigation, stem water potential, regulated deficit irrigation, trunk diameter fluctuations, water relations

ABSTRACT. Irrigation is one of the most important means of increasing olive oil production but little information exists on the responses of olive to variable water supply. Five different irrigation strategies, full irrigation, rain fed, and three deficit irrigation treatments were compared from 1996 to 1999, in Cordoba, southern Spain, to characterize the response of a mature olive (*Olea europaea* L. 'Picual') orchard to irrigation. Crop evapotranspiration (ET_c) varied from less than 500 mm in the rain fed to ≈ 900 mm under full irrigation. The deficit irrigation treatments had ET_c values that ranged from 60% to 80% of full ET_c depending on the year and treatment. Water relations, and oil content and trunk growth measurements allowed for the interpretation of yield responses to water deficits. In a deficit irrigation treatment that concentrated all its ET_c deficit in the summer, stem water potential (Ψ_s) decreased to -7 MPa but recovered quickly in the fall, while in the treatment that applied the same ET deficit progressively, Ψ_s was never below -3.8 MPa. Minimum Ψ_s in the rain fed treatment reached -8 MPa. Yield (Y) responses as a function of ET_c were calculated for biennial yield data, given the alternate bearing habit of the olive; the equation are: $Y = -16.84 + 0.063 ET - 0.035 \times 10^{-3} ET^2$, and $Y = -2.78 + 0.011 ET - 0.006 \times 10^{-3} ET^2$, for fruit and oil production respectively, with responses to ET deficits being similar for sustained and regulated deficit irrigation. The yield response to a deficit treatment that was fully irrigated during the bearing year and rain fed in the nonbearing year, was less favorable than that observed in the other two deficit treatments.

The olive (*Olea europaea* L.) is, among fruit trees, an important source of both fruit and edible oil. Increased appreciation of olive oil as part of the Mediterranean diet (International Olive Oil Council, 2001) has raised olive oil prices, leading to an important increase in new plantings in many world areas. Additionally, there have been trends to intensify olive production, primarily via high-density plantings and irrigation. Because olive has been traditionally a rain-fed crop in the Mediterranean region, little information exists on its irrigation requirements, and even less on the responses to variations in irrigation water supply (Orgaz and Fereres, 1997).

New irrigation developments are under close scrutiny at present and the economic advantages of shifting olive plantations from traditional rain fed to irrigation must be clearly demonstrated before new water is allocated for irrigation. Many olive growing regions suffer chronic water shortages and increased competition from other sectors for the available water resources (Fereres and Ceña, 1997). A basic tool to assess the value of irrigation water is the crop water production function (Vaux and Pruitt, 1983). Crop biomass and yield are linearly related to evapotranspiration (ET) but the relations with applied irrigation water are usually curvilinear (Stewart and Hagan, 1973). Sometimes, nonlinear relations between yield and ET have been observed (i.e., cotton; Orgaz et al., 1992). It is important to characterize the production function of olive, a crop that has a reputation of being drought resistant. If the response to variation in ET is nonlinear, optimal ET levels can be defined for different oil and water prices and deficit irrigation programs to achieve such ET levels could be formulated.

Reports on the responses of olive yield to variable amounts of applied water differ according to different sources. Lavee et al.

(1990) found that applications of 75, 150 and 200 mm in one, two or three irrigations over the season were about equally effective in increasing yields over rain fed conditions. Patumi et al. (1999) reported that irrigation significantly increased yield over rain fed conditions, but that applying 24, 50 or 75 mm of water made no difference in the response. Pastor et al. (1999) showed a large yield increase ($\approx 100\%$) with irrigation over rain fed conditions in a 4-year experiment, but found no significant differences among treatments when 150, 200, and 320 mm of irrigation were applied to a mature traditional orchard in Jaen (Spain). In contrast to the results above, Baratta et al. (1986) found that 800 to 1000 mm of applied water were needed for maximum yields in Trapani (Italy) although they proposed that irrigation may be reduced after pit hardening. Goldhamer et al. (1994) found a linear relationship between yield and revenue, and applied water up to 950 mm in a mature orchard in the San Joaquin Valley of California. Subsequent research by Goldhamer (1999) suggested that irrigation may be reduced during the summer without a yield reduction. In other fruit trees, where irrigation is common, a practice called regulated deficit irrigation (RDI) has been proposed to reduce tree water use without a yield penalty (Chalmers et al., 1981; Mitchell et al., 1989). Under RDI, such reductions in irrigation need to be imposed at times when tree yield responses are minimally affected by water deficits (Boland et al., 2000a, 2000b; Mitchell et al., 1989). It is therefore important to identify the periods when fruit trees are relatively insensitive to water deficits in order to design RDI strategies that conserve water (Fereres and Goldhamer, 1990).

This work was undertaken to characterize the response of a mature olive orchard to variable water supply and to study the water relations and the yield response under unlimited supply and rain fed conditions. Three deficit irrigation regimes were imposed to 1) identify effects of stress timing on tree responses and yield

Received for publication 19 June 2002. Accepted for publication 15 Jan. 2003. We thank Juan Castro, Francisco Camacho, Carmen Ruz and María Dolores Humanes for skillful technical assistance.

Table 1. Reference Evapotranspiration (ET_0) and rainfall during the rainy (P_r) and dry (P_d) periods in the 3 experimental years.

Year	ET_0 (mm)	P_r (mm)	P_d (mm)
1997	1,328	1,039	3.9
1998	1,389	395	11.9
1999	1,543	463	4.9

and to 2) develop the water production functions for olive fruit and oil yield under the experimental conditions.

Materials and Methods

SITE DESCRIPTION AND EXPERIMENTAL DESIGN. The experiment was conducted between 1996 and 1999 in an 18-year-old olive (*Olea europaea* L. cv. Picual) orchard located at the CIFA Experimental Station, Cordoba, Spain (38°N, 4.8°W, 110 m altitude). The climate is Mediterranean with an average annual rainfall of 602 mm, mostly distributed outside a 4-month summer drought period. Annual rainfall between 1995 and 1999 was 478, 1095, 1043, 407 and 468 mm, respectively. The soil is a Typic Xerofluvent of alluvial sandy loam texture and over 2 m deep. Tree spacing was 6 × 6 m; irrigation was applied 5 d a week, by the drip method with four (4 L·h⁻¹) emitters per tree. A randomized complete-block design was used with three replications of 16 trees each, and the following five irrigation treatments.

- A control treatment (CON), that applied the estimated evapotranspiration (ET_c) based on the fully replenishing soil water extraction.
- A regulated deficit irrigation treatment (RDI) that applied 75% of ET_c (rainfall plus irrigation) with a midsummer (15 July to 15 September) deficit period without irrigation.
- A sustained deficit irrigation treatment (SDI) that also applied 75% of ET_c (rainfall plus irrigation) but distributed as the same proportion of ET_c throughout the irrigation season.
- A deficit irrigation treatment (AYI) adapted to the alternate bearing habit of the olive; it was rain fed only during the years of little or no crop (1996 and 1998) and fully irrigated, as CON, during the heavy crop years (1997 and 1999).
- A rain fed treatment (DRY).

The orchard was in rain fed conditions until 1995 when irrigation was uniformly applied to the whole orchard. The first year of differential irrigation treatments (1996) has not been considered in the results. Leaf nutrient analyses in July were used every year to determine the fertilization needs. Table 1 presents the basic information on reference ET (ET_0) and rainfall for the experimental years.

IRRIGATION REGIMES. Applied water was calculated by estimating tree evapotranspiration (ET_c) using tree canopy size and long-term average reference evapotranspiration (ET_0) by using a model of olive tree transpiration (Villalobos et al., 2000). Evaporation from soil was estimated with Bonachela et al. (2001) model. During the

experiment, actual precipitation was considered as part of applied water in RDI and SDI.

SOIL WATER AND EVAPOTRANSPIRATION MEASUREMENTS. Volumetric soil water content was measured with a neutron probe calibrated for the experimental soil with separate calibrations performed for the upper (0 to 0.30 m) and lower (below 0.30 m) layers. Eight access tubes, 2.5 m long, were placed between two trees per replicate plot in the four irrigated treatments and six tubes were placed in the rain fed treatment. The area occupied by a tree was divided into zones that were wetted by the emitters or not wetted. An access tube was placed in the center of each zone and its reading was taken as representative of the water content of the zone. A weighted average based on the area of each zone was performed to calculate the soil water content and the extraction by each tree. Measurements were taken every 15 d at various depths, starting at 0.075 m down to 2.25 m. The upper limit (field capacity) of available water is 0.17 cm³·cm⁻³ and the lower limit of available water (permanent wilting point) is 0.05 cm³·cm⁻³.

Crop evapotranspiration (ET_c) was calculated by adding the two estimates of ET_c during the rainy and the irrigation seasons. Deep percolation was assumed to be negligible based on subsoil water content measurements and on hydraulic conductivity estimates for the experimental soil. ET_c was then calculated as

$$ET_c = (\theta_1 - \theta_2) + I + R \quad [1]$$

where θ_1 and θ_2 are the volumetric water content of the first day and the last day, respectively, of the period considered, I is the amount of irrigation during the period considered, and R is the rain during the period considered (see Table 1).

During the rainy season, deep percolation did not allow for a precise ET_c estimate using Eq. [1] so ET_c was calculated with the FAO method (Doorenbos and Pruitt, 1974):

$$ET_c = ET_0 \times K_c \times K_f \quad [2]$$

where ET_0 is the reference evapotranspiration, K_c is crop coefficient, and K_f is a coefficient to correct for incomplete cover.

During the rainy period, we assumed that the differences in ET_c among treatments were small relative to the seasonal ET_c because tree water status was similar among treatments (with the exception of the 1998 winter) and evaporative demand was low. Therefore, the same values of K_c and K_f were used in all the treatments. ET_0 was estimated with the Penman-Monteith equation using daily data from an automatic weather station nearby (300 m away from the experimental orchard). The K_c values are reported by Orgaz and Fereres (1997) while we estimated a value of 0.8 for K_f (Fereres and Goldhamer, 1990).

Neutron probe measurements were combined with data on applied water measured volumetrically to determine ET_c for the various treatments, as shown in Table 2. The final measurements of ET_c in each treatment (Table 2) indicated that water consumption of RDI was the 71%, 75%, and 58% of CON ET_c , while the ET_c of SDI was 79%, 81%, and 62% of CON ET_c , for 1997, 1998, and 1999, respectively.

Table 2. Applied water (AW) and crop evapotranspiration (ET_c) in all the treatments during the 3 years of experiments.

Treatment	AW (mm)			ET_c (mm)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
CON	509	454	734	814	778	899
RDI	114	130	150	582	589	526
SDI	147	112	239	649	636	562
AYI	549	14	772	822	576	839
DRY	0	0	0	550	582	393

PLANT WATER RELATIONS AND GROWTH. As in pear trees (Naor, 2001), the level of crop load affects olive water relations (Moriana, 2001). Therefore, for the measurements that follow, four trees per treatment of one block with a similar, heavy crop load, were selected in 1998 to carry out the detailed water relations measurements. Those trees are referred hereafter as "on" trees. In 1999, the same measurements were performed in four different "on" trees of the same block, unless otherwise indicated. The objectives of the measurements were to document the underlying responses of the various treatments to the irrigation regimes. The wide variability in fruit load among trees of the same individual plots forced us to select trees with similar, heavy loads, for comparative purposes.

Stem water potential (Ψ_x) measurements were used to evaluate tree water status. Fully expanded leaves located in branches near the main trunk were covered with aluminium foil at least 1 h before excision and the water potential was measured with a pressure chamber at midday (Soil Moisture Equip., Santa Barbara, Calif.). Stem water potential was measured periodically, starting in 1998, in one leaf per tree on four "on" trees of one block per treatment.

Trunk diameter fluctuations (TDF) were measured with a linear variable differential transformer (LVDT) (model DF 2.5; Solartron Metrology, West Sussex, U.K.) mounted in a holder built of aluminum and INVAR, an alloy composed of 64% Fe and 35% Ni that has minimal thermal expansion. The four "on" trees where Ψ_x was measured were instrumented during 1998 and four "on" and four "off" trees, with little to negligible fruit load, were measured during 1999 in one block of all treatments except in the AYI treatment. The trees had three to four scaffolds emerging from the trunk, all ≈ 11.7 cm in diameter. The sensors were attached to the south main scaffold of each tree. Measurements were taken on each experimental tree every 30 s and the datalogger (model CR21X, Campbell Sci., Logan, Utah) was programmed to calculate 15 min means. The daily TDF cycle provides three different indices; maximum daily diameter (MXTD), minimum daily diameter (MNTD) and maximum daily shrinkage (MDS), the latter taken as the difference between MXTD and MNTD (Goldhamer and Fereres, 2001). The measurements (MDS) are presented relative to control values (RMDS).

Abaxial leaf conductance (g_l) was measured in 1998 and 1999 with a transient porometer (model AP-4; ΔT , Cambridge, U.K.) between 1300 to 1600 hr on three sunny, fully expanded leaves per tree and on four "on" trees per treatment.

FRUIT AND OIL YIELD MEASUREMENTS. Thirty fruit of three trees per treatment and block were sampled periodically to determine oil content with Nuclear Magnetic Resonance (NMR), except in the AYI treatment, and the results were compared with LSD test. All of the experimental trees were harvested during winter (from 8 to 13 Jan. 1998, from 15 to 19 Dec. 1998, and from 5 to 12 Jan. 2000, respectively). Individual fruit weight of each tree was measured and a subsample of 150 fruit from each tree was obtained for oil content determinations and fruit weight. The oil and fruit yield results were analyzed with ANOVA and LSD tests using the SYSTAT program (SYSTAT 7.0 for Windows, SPSS Inc.).

Results

SOIL WATER CONTENT AND ET_c . Figure 1 presents the evolution of soil water content (θ_v) between 1997 and 1999. Heavy rains in the winter of 1997 prevented treatment differences until day 160 (Fig. 1a). From day 200 on, the θ_v of SDI decreased below those of CON and AYI treatments. Soil water content recovered following autumn rains and, by early 1998, all treatments had the same θ_v (day

40, Fig. 1b). In the summer of 1998, θ_v decreased sharply in all the treatments except in CON, where it remained ≈ 0.15 cm³ cm⁻³ (Fig. 1b). Insufficient rainfall in the winter of 1998 did not allow for θ_v recovery in all four (RD1, SDI, AYI and DRY) deficit treatments, so that in early spring of 1999 there were significant differences in θ_v (Fig. 1c). Clear differences were observed among all treatments throughout 1999 (Fig. 1c).

The seasonal ET_c varied from less than 500 to nearly 900 mm (Table 2) with large differences among treatments and years. The higher ET_c in 1999 produced higher differences in ET_c among treatments. The maximum reduction in ET_c caused by water deficits also occurred during 1999 season, the warmest year, when ET_c of DRY treatment was less than 50% of CON ET_c . In AYI treatment, the lack of irrigation during 1998 reduced ET_c but did not produce a clear reduction in the ET_c of the following year when irrigation was resumed as in CON (Table 2).

TREE WATER STATUS. Midday stem water potential (Ψ_x) varied widely among treatments (Fig. 2). In 1998, Ψ_x in the deficit treatments departed from control values on day 163 and reached the greatest differences around mid-September (Fig. 2a). Recovery of Ψ_x was apparently completed early following winter in 1999; however, the dry winter allowed for Ψ_x differences to develop early

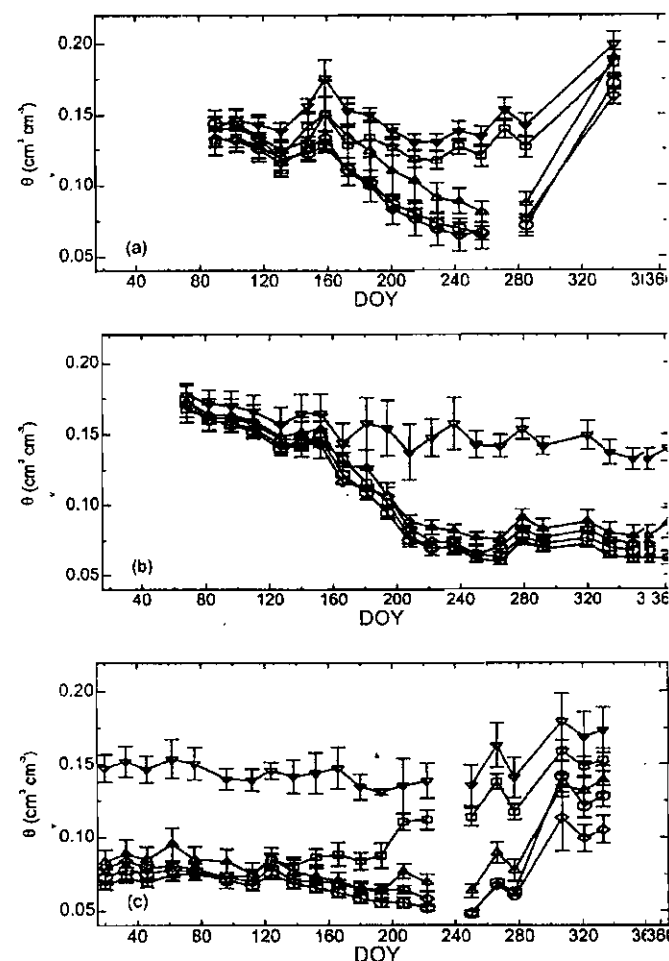


Fig. 1. Evolution of volumetric soil water content (θ_v ; cm³ cm⁻³) during 1997, 1998 and 1999 in CON (∇), RD1 ($\diamond$), SDI (Δ), AYI ($\square$), and DRY ($\circ$) treatments. Each point is the weighed average for the total 2.4-m profile of each set of eight access tubes, also averaged for the three replicate plots. The vertical bars represent twice the standard error.

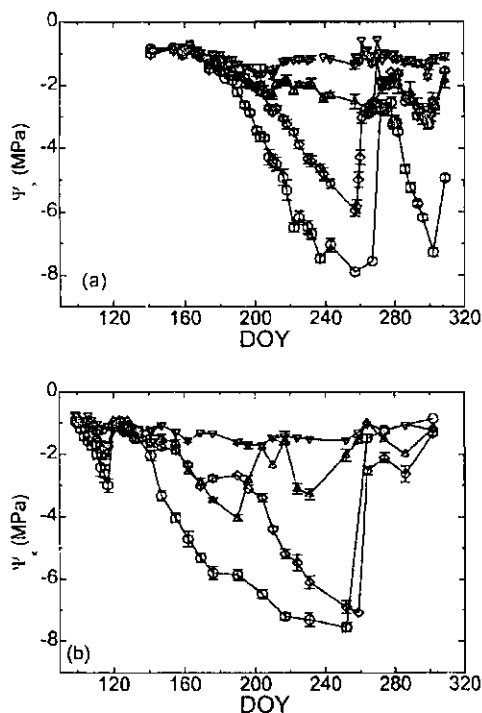


Fig. 2. Evolution of midday stem water potential during 1998 and 1999 in CON (▽), RDI (◊), SDI (Δ), and DRY (○) treatments. Each point is the average of four measurements and the vertical bars represent twice the standard error.

in the Spring, when Ψ_s reached -3 MPa in DRY before the rains (after day 120) allowed for complete recovery (Fig 2b). Soon after, Ψ_s declined again in the deficit treatments until day 255, when it reached very low values in RDI and DRY (nearly -8.0 MPa) and then recovered after day 265 (Fig. 2b).

Relative maximum daily shrinkage (RMDS) varied from almost 3 to less than 0.3 in the stressed treatments (Fig. 3). During 1998, the highest RMDS values were recorded in late spring in RDI and DRY while the minimum values were also observed in the stressed treatments at the end of the summer drought, when RDI and DRY exhibited RMDS values well below 1. However, the RMDS of SDI remained above that of CON (Fig. 3a). In 1999, treatment differences in RMDS values were less pronounced (Fig. 3b).

In 1998 midday leaf conductance (g_i) was similar in all treatments until day 180, when it started to decrease in the deficit treatments (Fig. 4a). The greatest g_i differences were observed by the end of the summer, when g_i of DRY was a small fraction of the control values. Following autumn rains, g_i recovered, although recovery was not complete (Fig. 4a). At the start of the measurements in 1999 there were differences in g_i among treatments (Fig. 4b). The effects of insufficient winter rainfall led to very low g_i values in DRY from the start of the measurements. From day 160 on, g_i of DRY reached a minimum value of $20 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and stayed around there until the autumn rains (Fig. 4b). By contrast, g_i of SDI and RDI decreased until day 250 when g_i of RDI had values similar to those of DRY. Irrigation during autumn in RDI caused a complete recovery in the g_i of RDI, up to control values, while recovery in DRY was incomplete despite substantial rainfall (≈ 60 mm on day 260 and 16 mm on day 285).

TRUNK AND FRUIT GROWTH. Figure 5 presents the seasonal patterns of trunk growth for 1999; in this season, the records for "off" trees in CON are also included. Trunk growth of CON trees depended on their fruit load; "off" trees grew more or less at a constant rate

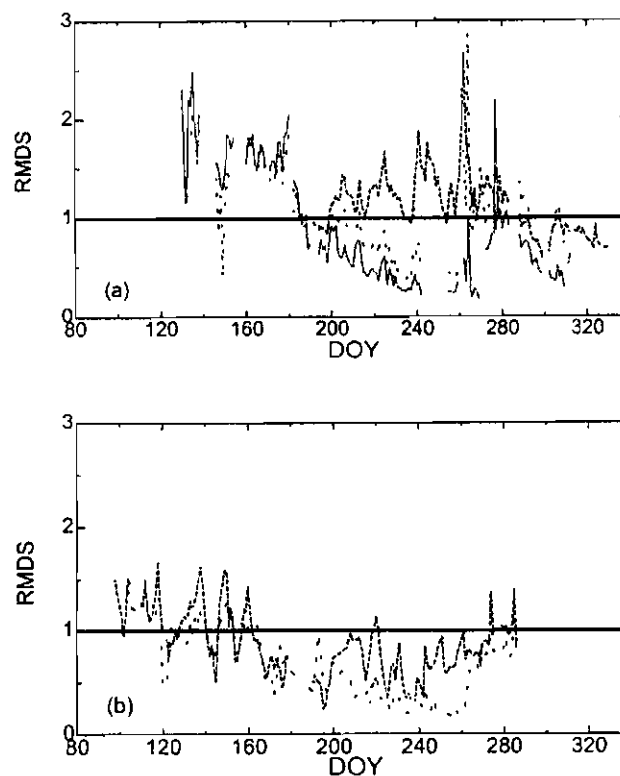


Fig. 3. Maximum daily shrinkage (RMDS) of all stressed treatments relative to CON during 1998 and 1999 measured in trees with a heavy crop load in RDI (---), SDI (-----), and DRY (....) treatments (DRY for 1998 only).

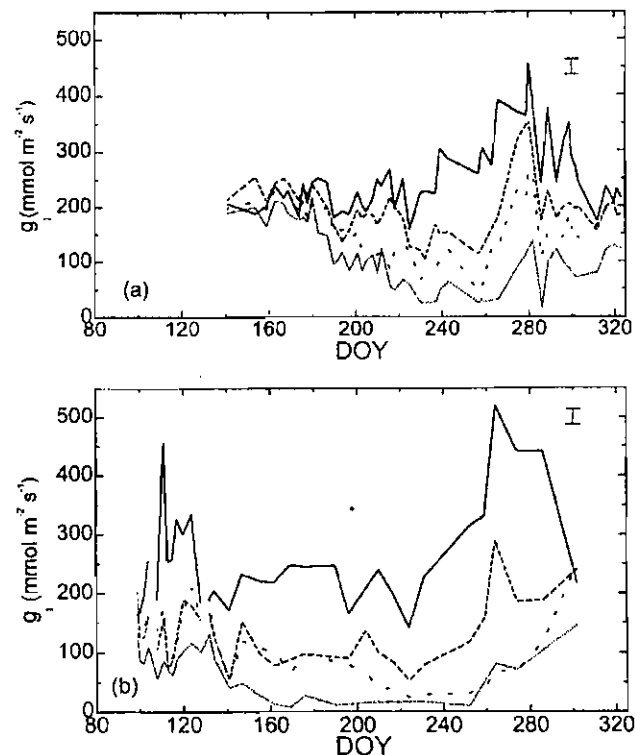


Fig. 4. Evolution of midday leaf conductance (g_i) during 1998 and 1999 in CON (---), RDI (---), SDI (-----), and DRY (....) treatments. Vertical bars represent twice the standard error.

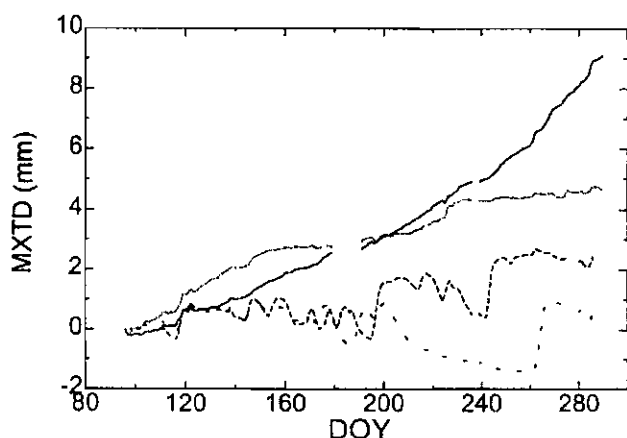


Fig. 5. Evolution of maximum trunk diameter (MXTD) during 1999 in: CON ('on' trees) (—), CON ('off' trees) (....), RDI (---), and SDI (— · —) treatments.

throughout the season, while growth of "on" trees nearly stopped at about day 150, resumed at a slow rate in midsummer and stopped again during autumn (Fig. 5). The trunks of all other treatments did not grow but rather shrunk slightly, exhibiting greater decreases in diameter during the periods of severe water stress and then recovered following rains (Fig. 5). Similar patterns of trunk growth were measured during the 1998 season (data not shown).

Oil accumulation in the fruit was affected by the irrigation treatment. A distinct pattern was observed during the three years and fruit of both RDI and SDI accumulated oil more rapidly than CON fruit. Figure 6 presents the oil accumulation in 1998 and 1999. Full irrigation delayed oil accumulation while the response of the rain fed treatment varied with year (Fig. 6).

FRUIT PRODUCTION, OIL YIELD AND YIELD COMPONENTS. There were large tree to tree variations in fruit and oil yield due to alternate bearing patterns. Because of the alternate bearing pattern of fruit and oil production, biennial production of each replicate plot was calculated. Significant differences among irrigation treatments (according to the LSD test) were found in the biennial yield (Table 3). To assess the pattern of yield response to variations in ET_c , we used biennial data from individual replicate plots where we had both yield and ET_c data, to carry out a regression analysis (Fig. 7). The data from one replicate plot of CON and another of RDI were not represented in Fig. 7 because after 1998, the trees where the access tubes were located, had clear symptoms of verticillium wilt, a vascular fungi (*Verticillium dahliae* Kleb.) that probably affected the transpiration of those particular trees. Also not included in the calculation of the $Y-ET_c$ relationship, were the three replicate points of AYI for 1998/99 (Fig. 7), where the unusual 1998/99 winter drought significantly reduced yield in that treatment. The best fit of both $Y-ET_c$ relationships were curvilinear, having greater coefficients of determination and lower mean square errors than the linear regressions (R^2 0.71 and 0.66 for fruit and 0.59 and 0.55 for oil, respectively). Table 4 presents the average number of fruit and individual fruit weight for all the treatments and for the three years. The big oscillations in the fruit numbers and the fruit weight among treatments and years are more extreme in the DRY and AYI treatments than in the other three.

Discussion

Our deficit treatments were designed to compare three means of reducing ET_c by sustained deficit (SDI), by concentrating the

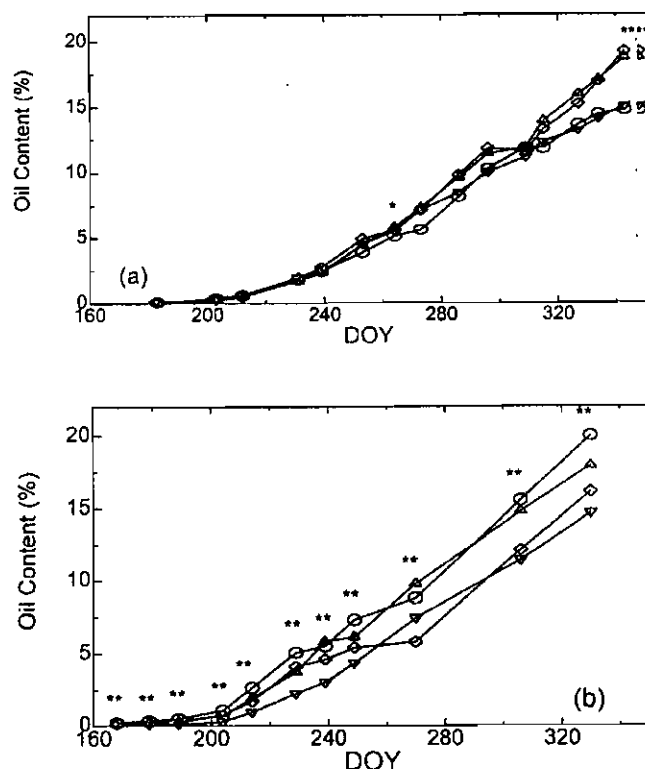


Fig. 6. Evolution of fruit oil content (% fresh weight) during 1998 and 1999 seasons in CON (∇); RDI ($\diamond$); SDI (Δ); and DRY ($\circ$) treatments. Each point is the average of 9 measurements. ***Significant differences in the LSD test at $P < 0.05$ or 0.01, respectively.

stress during an insensitive period which also has high evaporative demand (RDI), and by reducing ET_c during the nonbearing year (AYI). Research on yield responses to ET_c deficits have shown that most water production functions of row crops are linear (Vaux and Pruitt, 1983). By contrast, similar investigations with fruit trees strongly suggest that there are crop developmental periods where stress is not detrimental to yield, giving way to deficit irrigation strategies that can reduce ET_c while maintaining yield (Chalmers et al., 1981; Mitchell et al., 1989). The nonlinear response of olive yield to ET_c deficits shown in Fig. 7 indicates that water productivity was not constant in our experiment; rather, it varied from $22 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ at low ET_c (for 450 to 550 mm range) to $\approx 9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ when ET_c approached maximum ET_c (for 750 to 850 mm range) in fruit production and from $5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ to $\approx 0.2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ in oil production. In olive, Goldhamer (1999) found

Table 3. Fruit and oil yields (means and standard errors) computed in biennial periods for the 3 experimental years.

Treatment	1997-98		1998-99	
	Fruit (t ha ⁻¹)	Oil (t ha ⁻¹)	Fruit (t ha ⁻¹)	Oil (t ha ⁻¹)
CON	11.6 $\pm$ 0.4 a ²	1.9 $\pm$ 0.0 a	10.6 $\pm$ 0.2 a	2.0 $\pm$ 0.1 a
RDI	9.3 $\pm$ 1.2 b	1.6 $\pm$ 0.2 ab	7.0 $\pm$ 0.1 b	1.5 $\pm$ 0.1 ab
SDI	9.7 $\pm$ 0.6 ab	1.8 $\pm$ 0.1 ab	7.2 $\pm$ 0.6 b	1.5 $\pm$ 0.1 ab
AYI	9.2 $\pm$ 0.8 b	1.5 $\pm$ 0.2 ab	6.4 $\pm$ 0.5 bc	1.4 $\pm$ 0.1 b
DRY	7.9 $\pm$ 0.7 b	1.4 $\pm$ 0.2 b	5.1 $\pm$ 0.7 c	0.9 $\pm$ 0.2 c

²Treatments with the same letter are not significantly different by LSD test at $P \leq 0.05$.

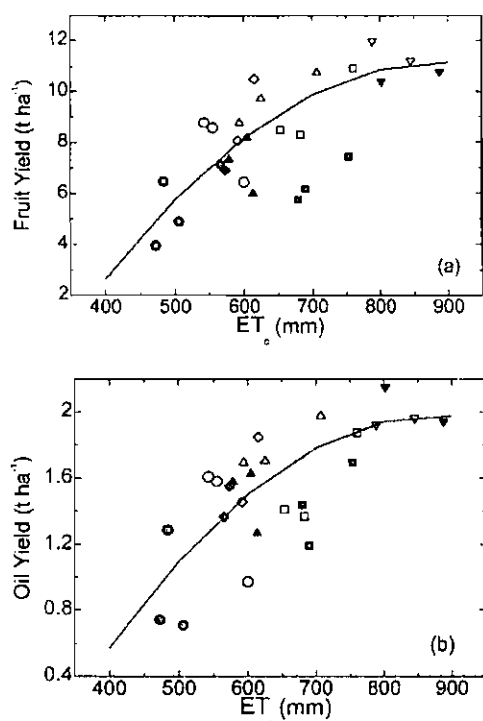


Fig. 7. Relationship between a) fruit yield (t ha^{-1}) and b) oil yield (t ha^{-1}) against olive evapotranspiration (ET_c , mm). Points represent yield and ET_c biennial averages for each replicate plot. Empty symbols correspond to 1997-98, while full symbols correspond to 1998-99 for CON (∇ , $\blacktriangledown$); RDI ($\diamond$, $\blacklozenge$); SDI (Δ , $\blacktriangle$); AYI ($\square$, $\blacksquare$); and DRY ($\circ$, $\bullet$) treatments. The best fit relationships are (a) for yield: $Y = -16.84 + 0.063 \text{ ET} - 0.035 \times 10^{-3} \text{ ET}^2$; $R^2 = 0.71$; $P < 0.001$; $\text{RMSE} = 1.2$; $n = 23$ and (b) for oil: $Y = -2.78 + 0.011 \text{ ET} - 0.006 \times 10^{-3} \text{ ET}^2$; $R^2 = 0.59$; $P < 0.001$; $\text{RMSE} = 0.3$; $n = 23$. The three data points of the AYI treatment in 1998/99 were not included in the regression analyses. For explanation see text.

that a reduction in applied water during midsummer of 15% and 25% of the seasonal application for maximum yield, did not have a negative impact on canning olive yields. A more severe deficit imposed by a 44% reduction in applied water, decreased yields by only 10%. Goldhamer (1999) did not report ET values for the different treatments, but considering that the predawn water potential values reported did not decrease below -0.9 MPa in the 15% and 25% applied water deficit treatments, it appears that the reductions in applied water in his experiment were not directly translated into ET deficits, hence the lack of yield response. Assuming a soil water extraction of ≈ 150 mm in the most severe deficit case (D.A. Goldhamer, personal communication), the severe stress treatment must have had an ET deficit of $\approx 25\%$ to 30% , with a yield decrease of $\approx 10\%$ below the maximum (Goldhamer, 1999), a very similar response to that depicted in Fig. 7.

The oil yield- ET_c response was very similar to the fruit- ET_c because the differences in oil content among treatments (Fig 6) were compensated by the differences in fruit size (Table 4). In several irrigation experiments in olive trees (Lavee and Wodner, 1991; Pastor et al., 1999; Patumi et al., 1999) reported that oil content in the rain fed treatment was the same, or even higher than the irrigated trees. The increase in fruit oil content in the water-stressed treatments may be explained by the release of stress during the last period of oil accumulation in the fall (Fig. 2) and by the lower fruit numbers per tree in those treatments (Table 4). Inglesse et al. (1996) reported higher oil content in the fruit of rain fed trees that were irrigated during the last phase of fruit growth. The favorable response of the deficit treatments is related to the normal rainfall patterns in Mediterranean climates and to the lower fruit load of the stressed trees.

The plasticity of the yield components in the olive in response to water was remarkable (Table 4). The DRY treatment varied fruit number and weight drastically in response to the level of water stress; in 1999 the severity of stress (Fig. 2b) led to very small fruit. The compensatory features of fruit number and weight in the other treatments were also apparent (Table 4) and suggest a significant capacity for recovery. Lavee and Wodner (1991) reported that olive fruit recovered dramatically following the release of water stress. The trunk growth patterns and the yield responses of the stressed trees suggest a shift in assimilate partitioning toward greater dry matter accumulation in the fruit of olive trees subjected to water deficits. Changes in dry matter partitioning are the basis for the RDI strategies in deciduous fruit trees (Chalmers et al., 1981; Mitchell et al., 1989).

It has been customary in the study of yield responses to irrigation, to emphasize the variable responses depending on the sensitivity of crop developmental stages to water deficits (Doorenbos and Kassam, 1979). In olive, it has been suggested that the most tolerant stress period occurs in midsummer (Baratta et al., 1986; Goldhamer, 1999; Orgaz and Fereres, 1997) and our hypothesis was that RDI should have had a more favorable yield response to ET deficits than SDI. The average reductions in ET_c and in yield in RDI and SDI were similar (Tables 2 and 3) and the scatter among individual replicate plots in the Y - ET_c relationship (Fig. 7 a and b), strongly suggest that there were no yield response differences between progressive stress (SDI) and the summer-concentrated stress (RDI). There were certainly major differences in the level of plant water stress experienced by both treatments; Ψ_x of RDI declined sharply in the summer several MPa below that of SDI (Fig. 2). If an integrated value of Ψ_x would have been used as an indicator of tree response (Ginestar and Castel, 1996) RDI yield should have been much less than SDI, which was not the case. The lower Ψ_x of RDI was associated with lower g values (Fig. 4) and presumably, lower photosynthesis (Moriani et al., 2002). Nevertheless, such differences in seasonal leaf conductance and in

Table 4. Number of fruit per tree and fruit weight (g) for all treatments and the 3 experimental years.

Treatment	1997		1998		1999	
	Fruit no.	Wt (g)	Fruit no.	Wt (g)	Fruit no.	Wt (g)
CON	22698 a*	2.36 a	18526 a	1.50 a	34871 a	1.35 ab
RDI	29390 a	1.64 a	26540 a	1.17 a	30702 ab	1.00 b
SDI	16790 ab	2.37 a	19689 a	1.37 a	18014 ab	1.73 a
AYI	23863 a	2.69 a	3077 b	1.21 a	20604 ab	2.13 a
DRY	9617 b	2.42 a	20458 a	1.64 a	8512 c	0.28 c

*Treatments with the same letter are not significantly different by LSD test at $P \leq 0.05$.

the other water relations parameters, apparently did not translate into yield differences between RDI and SDI. It should be pointed out, however, that our individual tree yield records indicate that the yields of the four RDI trees where the water relations parameters were measured, were $\approx 11\%$ less on the average, than those of the four SDI trees also monitored in detail (Moriána, 2001).

The reactions of individual trees to the irrigation regimes were clearly captured by the water relations measurements (Figs. 2–5). Among them, our results indicated that trunk growth is extremely sensitive to water deficits (Fig. 5). We also detected large differences in the seasonal pattern of trunk growth depending on crop load (Fig. 5). Trees with heavy fruit load exhibited the most active trunk growth until ≈ 4 weeks after full bloom, as shown for other olive shoot growth parameters by Rallo and Suarez (1989), and then grew very slowly for the rest of the year, while trees with a light crop load grew steadily throughout the season at an increasing rate (Fig. 5). There was hardly any increase in trunk diameter in the stressed treatments and here again, SDI differed from RDI in the same fashion as the other water relation parameters (Figs. 2–4).

The yield response of AYI offers an interesting contrast with the response patterns of all other stressed treatments. Following full irrigation in 1997 and very high yields (Table 4), AYI developed under rain fed conditions in 1998, completely depleted the soil profile by the end of the year (Fig. 1b), even beyond that of DRY. The severe drought in the fall of 1998 reduced AYI yields substantially, relative to CON yields. The unusual drought during the Winter 1998/99 and a delay in the start of irrigation, kept the soil moisture in AYI at very low levels until day 150 in 1999 (Fig. 1c) and that apparently had an important impact in the flowering and fruit set in that treatment. Our estimates of fruit numbers in AYI in 1999 were only 59% of CON and, even though there was some compensation in fruit size, AYI yields for the biennial 98/99 period were less than what could be predicted from the generalized response depicted in Fig. 7. Therefore the data points of AYI for 1998/99 were not included in the regression analysis for the development of the yield response function to ET.

It has been suggested that withholding water during the “off” year may not harm “on” year yields in pistachio trees (Stevenson and Shackel, 1998). Nevertheless, our results cast doubts on the viability of the AYI program in olive. Because of the severe drought during the rain fed period of 1998, AYI experienced water stress in the fall, when the fruit were filling and in the spring of 1999, when fruit set for the next crop was being determined. The unusual lack of rainfall during the winter season of 1998/99 had a more negative impact on the water productivity of AYI than on that of the other stressed treatments. Results from more experimental years are probably needed before reaching any firm conclusions on the potential of AYI as a deficit irrigation strategy; nevertheless, water deficits applied, either during midsummer or progressively during the whole season, appear to be about equally effective for reducing olive ET in situations where full irrigation supply is not a viable strategy.

Literature Cited

- Baratta, B., T. Curuso, L. Di Marco, and P. Inglese. 1986. Effects of irrigation on characteristics of olives in ‘Noceralla del Belice’ variety. *Olea* 17:195–198.
- Boland, A.M., P.H. Jerie, P.D. Mitchell, and I. Goodwin. 2000a. Long-term of restricted root volume and regulated deficit irrigation on peach: I. Growth and mineral nutrition. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 125:135–142.
- Boland, A.M., P.H. Jerie, P.D. Mitchell, and I. Goodwin. 2000b. Long-term effects of restricted root volume and regulated deficit irrigation on peach: II. Productivity and water use. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 125:143–148.
- Bonachela, S., F. Orgaz, F. Villalobos, and E. Fereres. 2001. Evaporation from the soil in the olive orchards under drip irrigation. *Irr. Sci.* 20:65–71.
- Chalmers, D.J., P.D. Mitchell, and L. van Heek. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106:307–312.
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1974. Crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper No. 24. Food Agr. Org. U.N., Rome.
- Fereres, E. and F. Cefia. 1997. Social benefits and environmental constraints of irrigation in an era of water scarcity, p. 128–136. In: M. Kay, T. Franks, and L. Smith (eds.). *Water: Economics, management and demand*. E & FNSPON, Chapman and Hall, London.
- Fereres, E. and D. Goldhamer. 1990. Deciduous fruit and nut trees, p. 987–1017. In: B.A. Stewart and D.R. Nielsen (eds.). *Irrigation of Agricultural Crops—Agronomy Monograph No. 30*. Amer. Soc. Agron., Madison.
- Ginestar, C. and J.R. Castel. 1996. Responses of young clementine citrus trees to water stress during different phenological periods. *J. Hort. Sci.* 71: 551–559.
- Goldhamer D.A. 1999. Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Hort.* 474:369–372.
- Goldhamer, D.A., J. Dunai, and L.F. Ferguson. 1994. Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Hort.* 356:172–175.
- Goldhamer, D.A. and E. Fereres. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irr. Sci.* 20:155–125.
- Inglese, P., E. Barone, and G. Gullo. 1996. The effect of complementary irrigation on fruit growth, ripening pattern and oil characteristics of olive (*Olea europaea* L.) cv. Carolea. *J. Hort. Sci.* 71:257–263.
- International Olive Oil Council (IOOC). 2001. Mediterranean flavours and the professional kitchen conference, Napa Valley, California. *Olivae* 87:20.
- Lavee, S., M. Nashef, M. Wodner, and H. Harshemesh. 1990. The effect of complementary irrigation added to old olive trees (*Olea europaea* L.) cv. Souri on fruit characteristics, yield and oil production. *Adv. Hort. Sci.* 4:135–138.
- Lavee, S. and M. Wodner. 1991. Factors affecting the nature of oil accumulation in fruit of olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *J. Hort. Sci.* 66:583–591.
- Mitchell, P.D., P.H. van den Ende, and D.J. Chalmers. 1989. Responses of ‘Bartlett’ pear to withholding irrigation, regulated deficit irrigation and tree spacing. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114:15–19.
- Moriána, A. 2001. Relaciones hídricas en olivo (*Olea europaea* L.) bajo riego deficitario. PhD thesis. Univ. Córdoba, Spain.
- Moriána, A., F. Villalobos, and E. Fereres. 2002. Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. *Plant Cell Environ.* 25:395–405.
- Naor, A. 2001. Irrigation and crop load influence fruit size and water relations in field-grown ‘Spadona’ Pear. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126:252–255.
- Orgaz, F. and E. Fereres. 1997. Riego, p. 251–272. In: D. Barranco, R. Fernández-Escobar and L. Rallo (eds.). *El cultivo del olivo*. Mundi Prensa, Madrid.
- Orgaz, F., L. Mateos, and E. Fereres. 1992. Season length and cultivar determine the optimum evapotranspiration deficit in cotton. *Agron. J.* 84:700–706.
- Pastor, M., J. Castro, M.J. Mariscal, V. Vega, F. Orgaz, E. Fereres, and J. Hidalgo. 1999. Respuesta del olivar tradicional a diferentes estrategias y dosis de agua de riego. *Invest. Agr.* 14:393–404.
- Patumi, M., R. D’Andrea, G. Fontanuzza, G. Morelli, P. Giorio, and G. Sorrentino. 1999. Yield and oil quality of intensively trained trees of three cultivars of olive (*Olea europaea* L.) under different irrigation regimes. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 74:729–737.
- Rallo, L. and M.P. Suarez. 1989. Seasonal distribution of dry matter within the olive bearing limb. *Adv. Hort. Sci.* 3:55–59.
- Stevenson, M.T. and K.A. Shackel. 1998. Alternate bearing in pistachio as a masting phenomenon: construction cost of reproduction versus vegetative growth and storage. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 123:1069–1075.
- Stewart, J.I. and R.H. Hagan. 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. *J. Irr. Drain. Div. ASCE* 99:421–439.
- Vaux, H.J. and W.O. Pruitt. 1983. Crop-water production functions, p. 61–97. In: D. Hillel (eds.). *Advances in irrigation*, vol 2. Academic Press, New York.
- Villalobos, F.J., F. Orgaz, L. Testi, and E. Fereres. 2000. Measurement and modeling of evaporation of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* 13:155–163.

EL RIEGO DE FRUTALES

Elías Fereres

Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC y Univ. de Córdoba
Apartado 4084, 14080-Córdoba, España (aglfecae@uco.es)

EL PROBLEMA:

¿CUANTA AGUA HAY QUE APLICAR?
(PARA MÁXIMA PRODUCCIÓN, CALIDAD Y **BENEFICIO**)

LA SOLUCIÓN ES EL PROBLEMA

Tú dame la receta: ¿Cuál es la Fórmula?

$$Kc = 0.16 + 0.8 Cs + 0.6 fw + 4 \times 0.75 F \times (1 - F) / ET_0$$

Kc: Coeficiente de cultivo mensual $ET = ET_0 \times Kc$

Cs: Cobertura del suelo (tanto por uno)

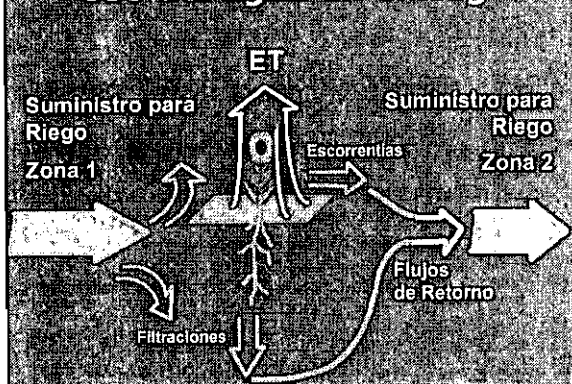
fw: fracción suelo mojado por el riego

(fw = 0, meses sin regar)

F: frecuencia de lluvias

$F = n / 30$ (n = nº días lluvia del mes)

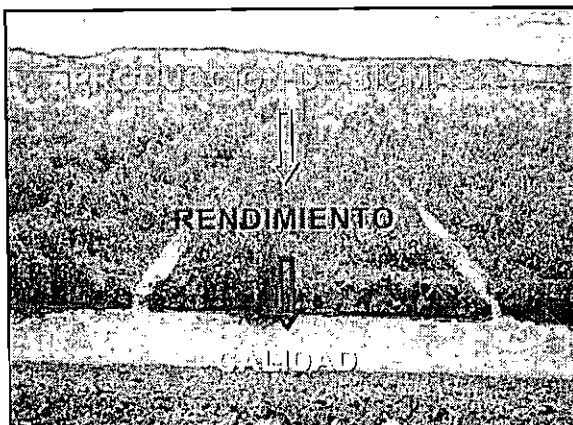
Uso del agua en el riego



¿Hacia dónde vamos?

BUENAS PRACTICAS AGRÍCOLAS (GAP)

1. Producir suficientes alimentos (nutritivos y sanos) de forma económica y eficiente.
2. Mantener y mejorar los recursos naturales.
 - Mantener la viabilidad de las empresas agrarias, contribuyendo a la sostenibilidad.
 - Responder a las demandas sociales y culturales de la sociedad.



FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

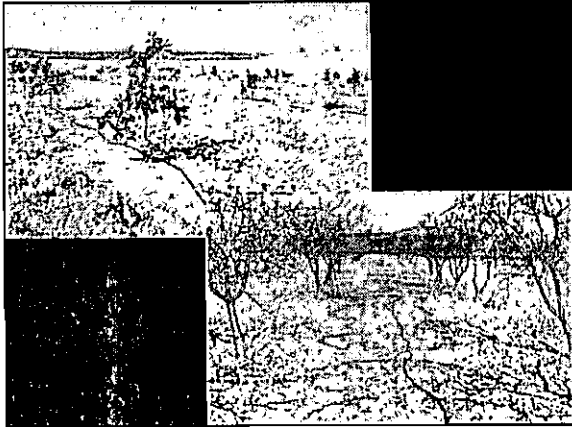
1. Productividad de un cultivo:

I. Relación entre radiación interceptada y acumulación de materia seca.

II. Procesos que determinan el rendimiento cosechable.

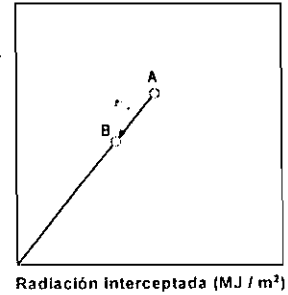
III. Relación entre producción de biomasa y agua.

IV. Relación entre rendimiento económico y agua.



Sensibilidad de la acumulación de biomasa a la reducción del crecimiento vegetativo

Reducción de
Biomasa (T/ha)



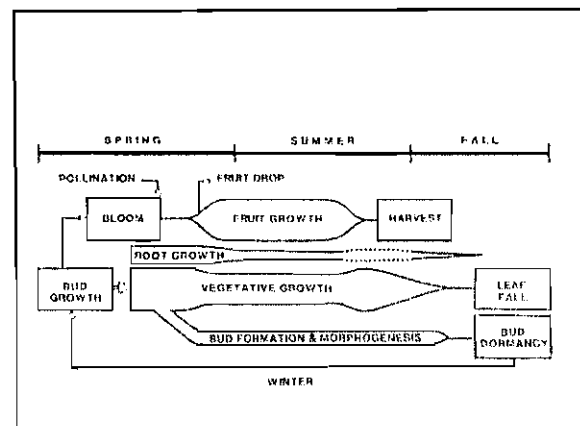
Radiación Interceptada (MJ / m²)



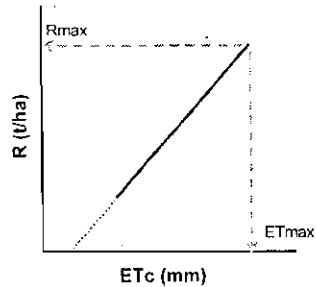
FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

1. Productividad de un cultivo:

- I. Relación entre radiación interceptada y acumulación de materia seca.
- II. Procesos que determinan el rendimiento cosechable.
- III. Relación entre producción de biomasa y agua.
- IV. Relación entre rendimiento económico y agua.

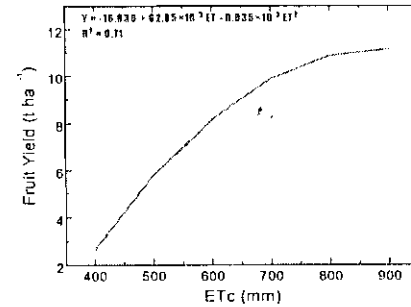


Función de Producción típica Cultivos Herbáceos

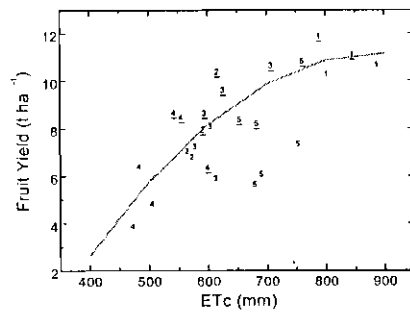


Función de Producción OLIVO; Córdoba, 1996-2000

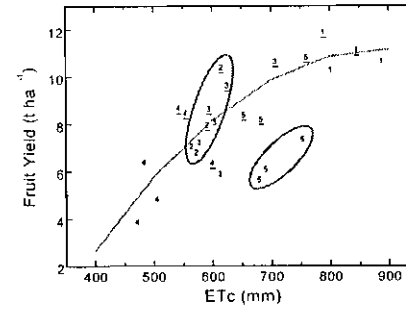
(Moriana et al., JASHS, 2003)



Función de Producción OLIVO; Córdoba, 1996-2000



Función de Producción OLIVO; Córdoba, 1996-2000



FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

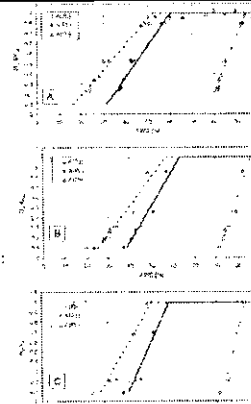
2. El agua en el continuo suelo-árbol-atmósfera:

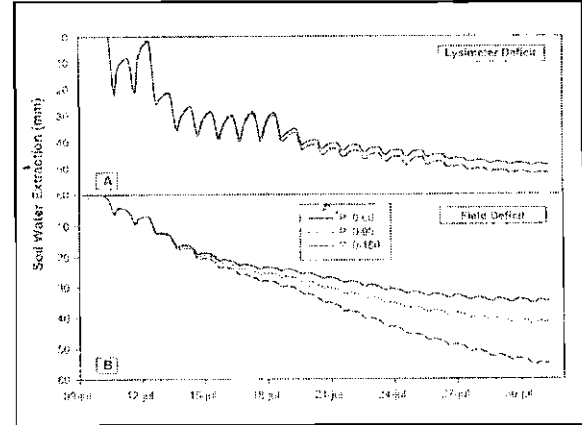
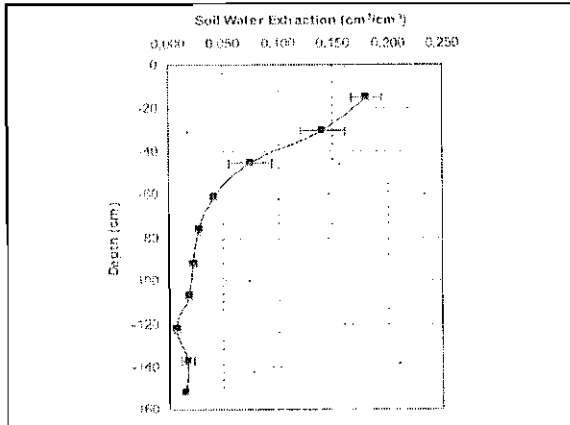
- Resistencias y Flujos.
- El agua en el suelo.
 - a) Estado y movimiento del agua en el suelo.
 - b) Límites de almacenamiento del agua: *capacidad de campo* y *punto de marchitez*.
 - c) Medida del agua en el suelo: limitaciones.

III. La transpiración y el comportamiento estomático.

- a) El proceso de transpiración: gradientes y resistencias.
- b) La conducción de agua a través del xilema.
- c) Funciones de los estomas
- d) Factores que regulan el comportamiento estomático.
- e) La ET de huertos frutales.

El suelo como
Almacén:
El objetivo es
que el déficit
de agua en el
suelo no
rebase el
Déficit
Permisible, pero:
¿Cuál es el
Déficit
Permisible?





FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

2. El agua en el continuo suelo-árbol-atmósfera:

- Resistencias y Flujos.
- El agua en el suelo.
 - Estado y movimiento del agua en el suelo.
 - Límites de almacenamiento del agua: *capacidad de campo* y *punto de marchitez*.
 - Medida del agua en el suelo: limitaciones.
- La transpiración y el comportamiento estomático.
 - El proceso de transpiración: gradientes y resistencias.
 - La conducción de agua a través del xilema.
 - Funciones de los estomas
 - Factores que regulan el comportamiento estomático.
 - La ET de huertos frutales.

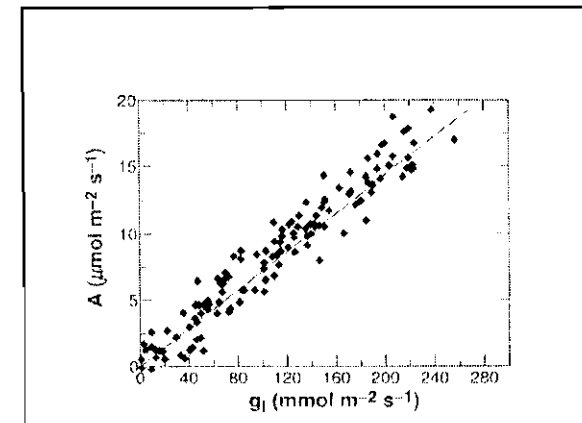
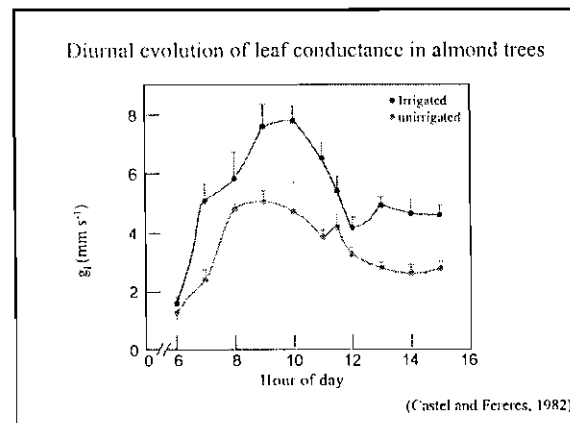
El flujo de agua a través del sistema suelo-árbol-atmósfera

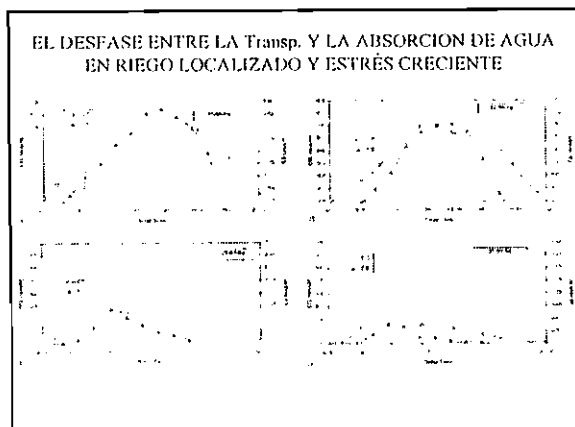
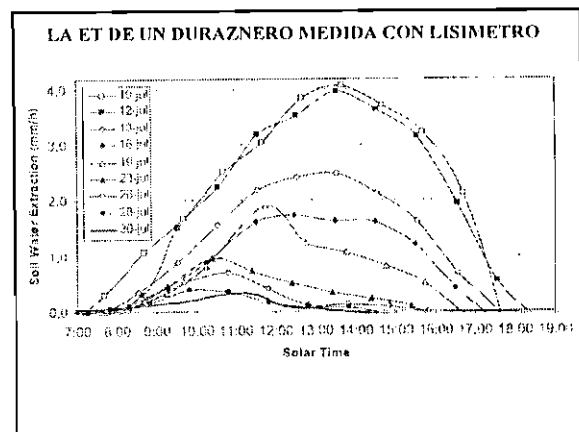
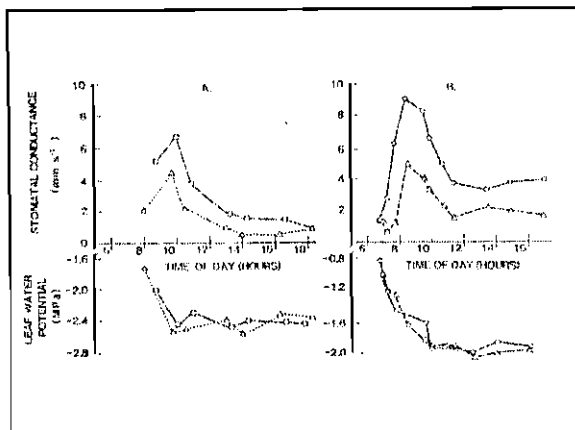
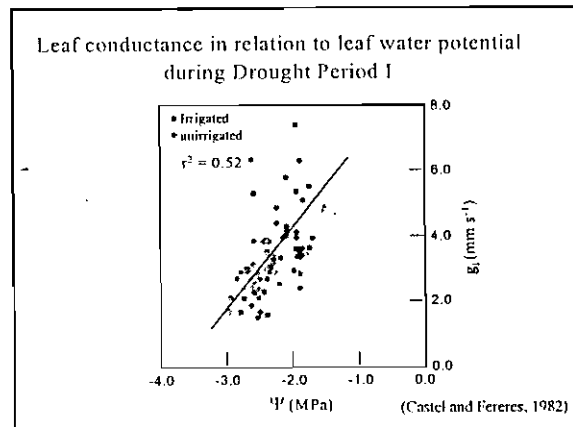
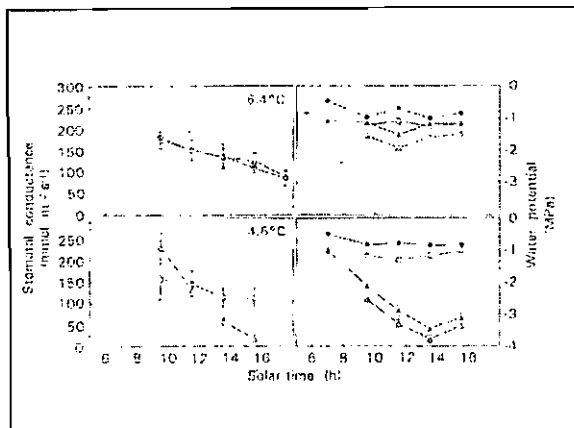
Fuerza motriz: gradiente de potencial hídrico

Resistencias en fase líquida:

- Del suelo a la superficie de la raíz
 - De la raíz al xilema
- Del xilema a las cavidades subestomáticas
 - De las cavidades al aire

Las resistencias más importantes son la resistencia estomática y la del aire; a nivel de huerto pasan a ser la resistencia de la cubierta (canopy) y la resistencia aerodinámica.



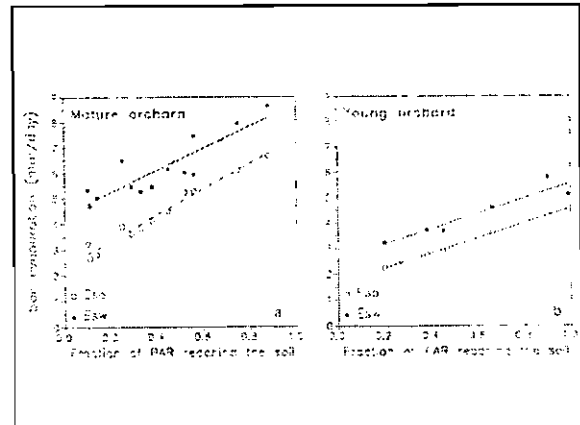
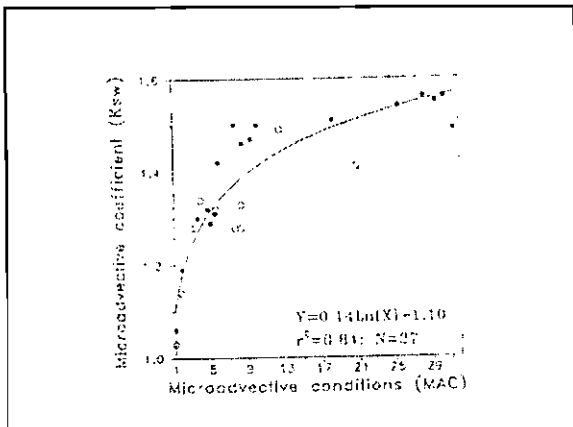
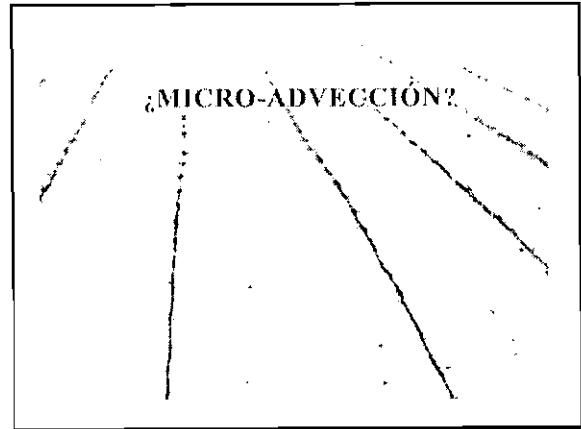
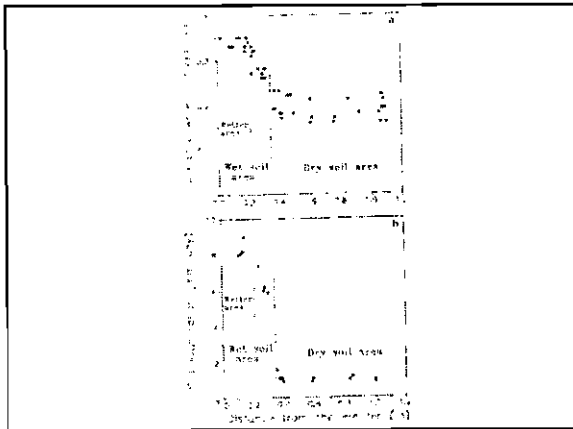
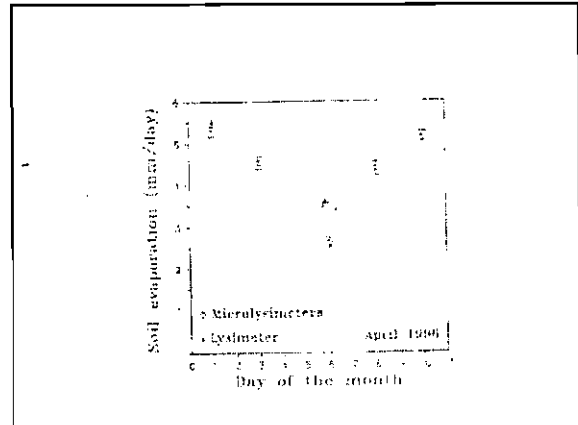
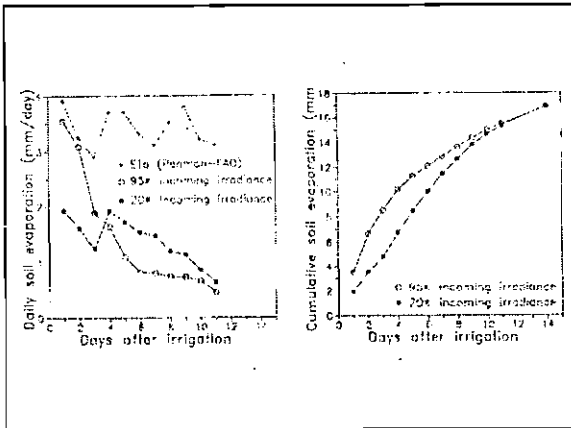


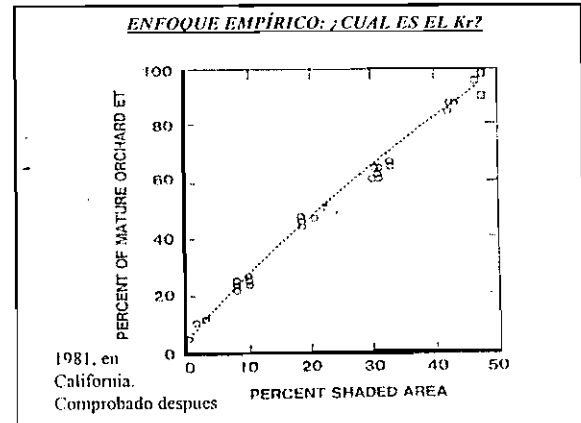
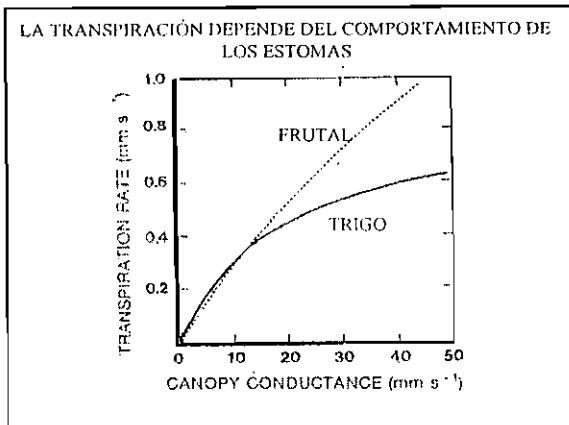
Necesidades hídricas de un huerto

Cálculo de la evaporación desde el suelo y de la transpiración del árbol por separado.

El proceso de evaporación (E_s) en microriego:

- *Es desde suelo sombreado*
- *Es desde suelo soleado*
- *Es desde suelo húmedo por el gotero*
- *Es desde suelo seco*





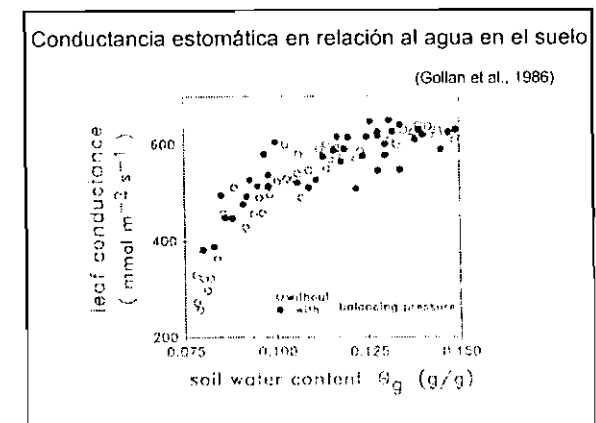
- FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES
- IV El sistema radical: Estructura y funcionamiento.
- a) Funciones del sistema radical: anclaje, absorción, síntesis de reguladores de crecimiento y ¿sensores del estrés hídrico?
 - b) Crecimiento de las raíces.
 - c) Absorción de agua: patrones de absorción.
 - d) Factores ambientales que afectan al crecimiento radical.

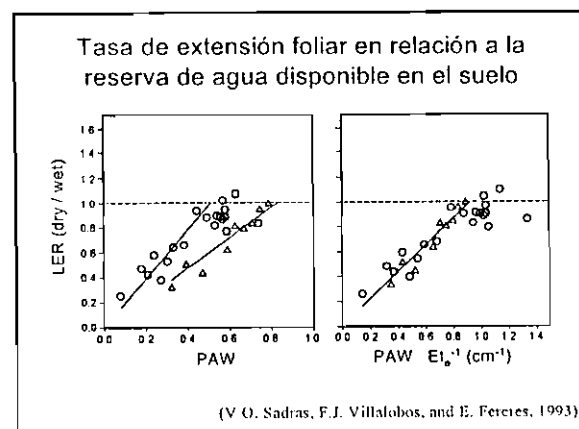
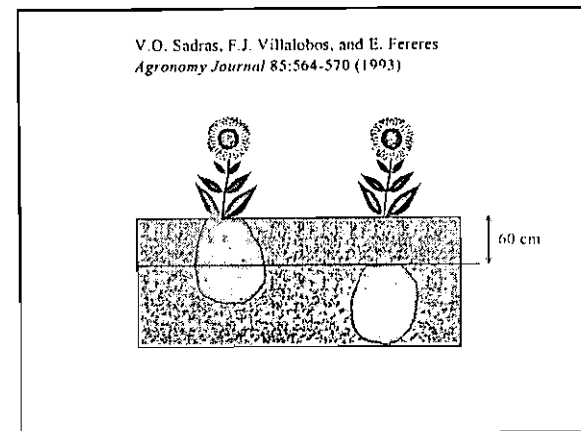
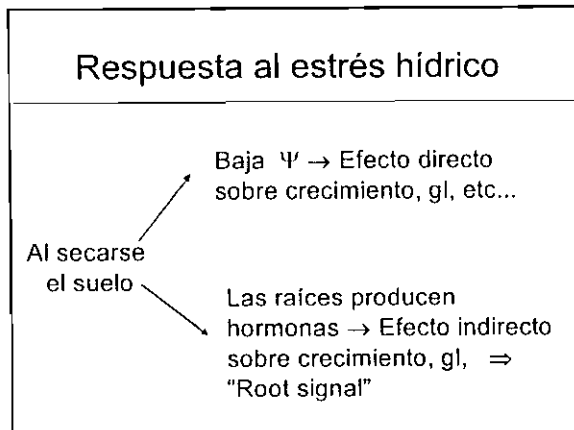
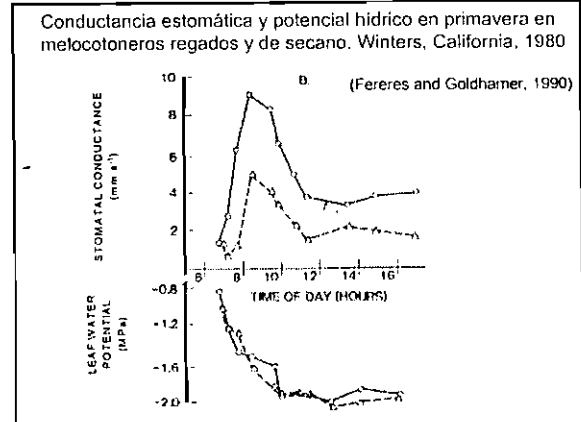
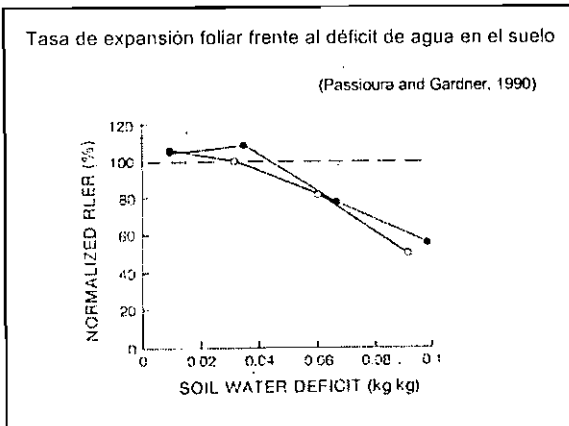
"Leaf responses are better described by soil water content than by leaf water potential"

(Turner et al., 1985)

"A signal from roots experiencing dry soil is transmitted to the leaf so that water loss is reduced before the plant experiences water stress"

(Schulze, 1993)

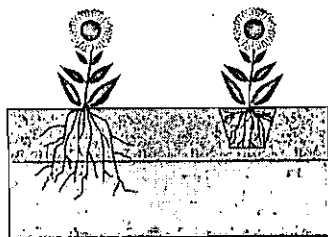




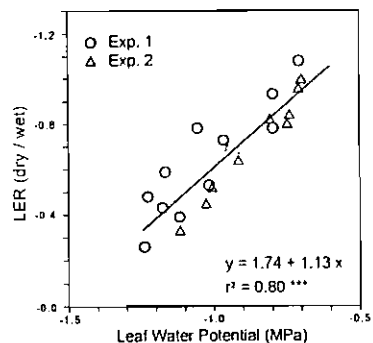
Munns et al., 2000:
"Leaf water status can limit growth.... despite hormonal controls over the long term"

Davies et al., 2000:
"Hydraulic signals": 124 cm
"Chemical signal": 21 cm

¿Control en la raíz o en la parte aérea?

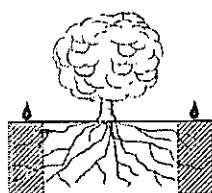


Relationship in sunflower between leaf expansion rate and leaf water potential

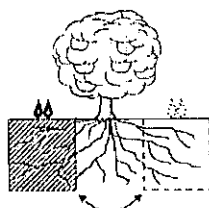


(V.O. Sadras, F.J. Villalobos, and E. Fereres, 1993)

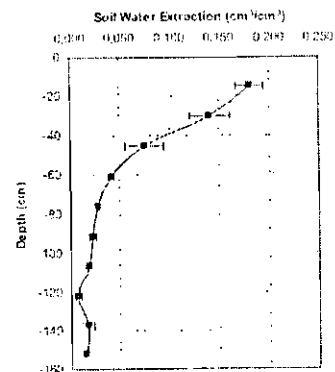
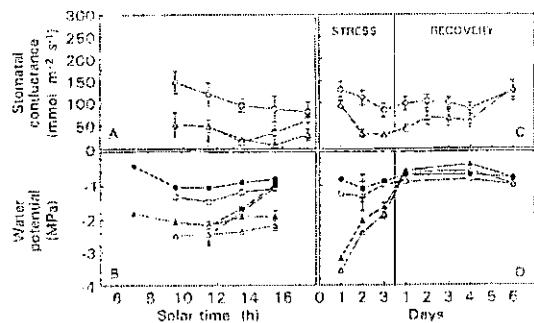
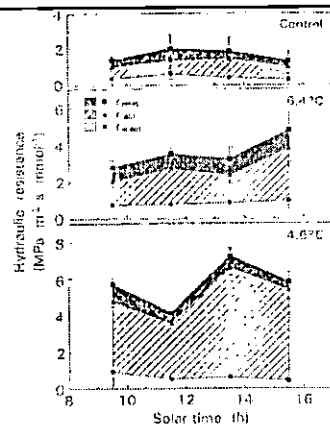
Deficit Irrigation

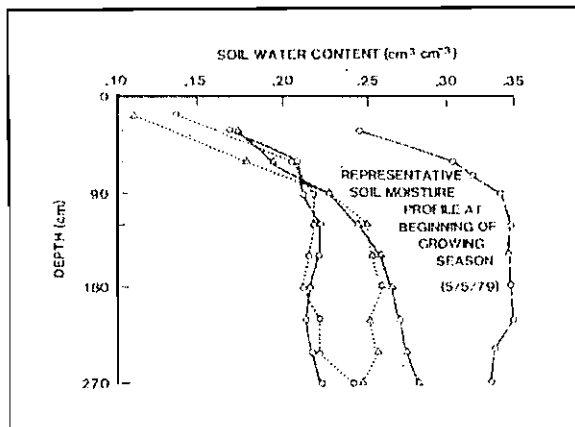


Partial Root Drying



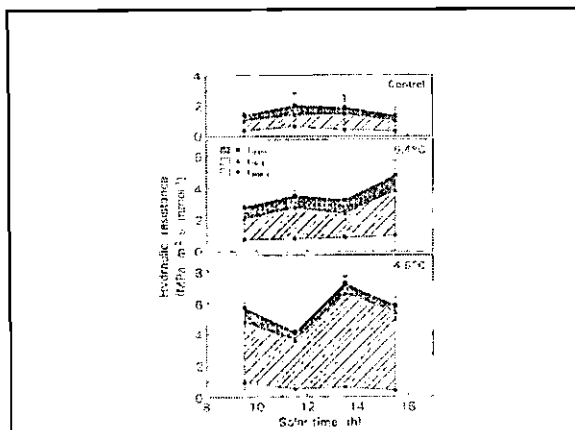
Can plants tell right from left?
(Maybe grapevines can!)





IV El sistema radical: Estructura y funcionamiento.

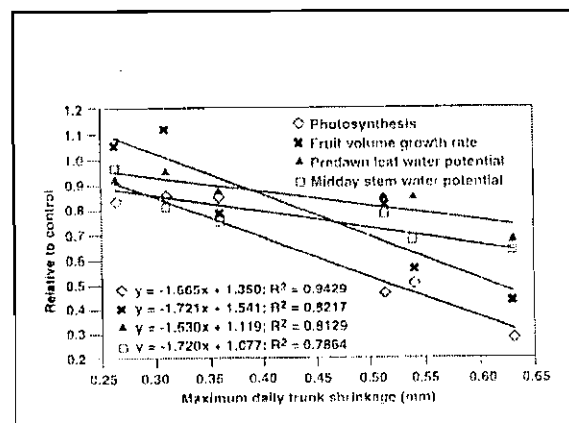
- Funciones del sistema radical: anclaje, absorción, síntesis de reguladores de crecimiento y sensores del estrés hídrico?
- Crecimiento de las raíces.
- Absorción de agua: patrones de absorción.
- Factores ambientales que afectan al crecimiento radical.



TREE PROCESS OR PARAMETER	WATER STRESS LEVEL	
	MILD	SEVERE
TRUNK GROWTH (-)	High	Low
YIELD (in-shell splits) (-)	High	Low
SHOOT LENGTH (-)	High	Low
BLANKING & ABORTION (+)	Low	High
SHOOTS/TREE (-)	High	Low
SHELL SPLITTING (-)	High	Low
LEAF SIZE (-)	High	Low
CLUSTERS/TREE (-)	High	Low
NUTS/TREE (-)	High	Low
HARVESTABILITY (-)	High	Low
NUT WEIGHT (-)	High	Low
NUT SIZE (-)	High	Low

3. Respuestas de los cultivos al déficit hídrico:

- El crecimiento vegetativo.
- Los procesos de floración y fructificación.
- La conductancia estomática.
- La senescencia foliar.
- Los efectos interanuales de la sequía.
- La recuperación de la sequía.



The Promise of Regulated Deficit Irrigation in California's Orchards and Vineyards

By David A. Goldhamer, Water Management Specialist, University of California, and
Elias Fereres, Professor, IAS-CSIC and University of Cordoba, Spain

Agriculture uses about 75 percent of all the developed water in California, and the expanding population and efforts to maintain or improve animal habitat and stream flows will require even more water in the future. With no significant expansion of water supplies and possible partial loss of existing resources, agricultural water use is being seen by many as a potential water source. The recent controversy over the transfer of water from agriculture in Imperial County to the City of San Diego illustrates this issue. Some maintain that Imperial growers could free up the amount of water in question by improving their surface irrigation management, such as waste less water by reducing deep percolation below the crop root zone or end of field runoff. The growers argue that there are limits to how much water can be saved by reducing irrigation water losses (also called improving application efficiency) and point to reduced planting acreage, increased salinity, and associated loss of production and agricultural jobs as likely effects.

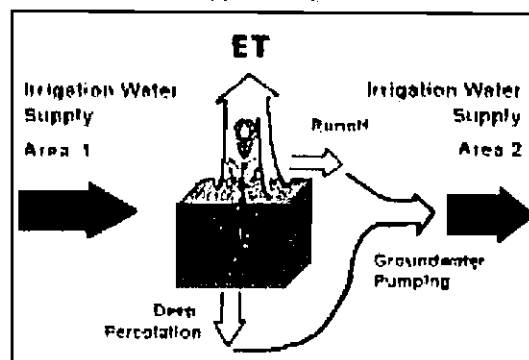
Statewide, California growers have steadily improved their application efficiency over the last couple decades. Moreover, deep percolation and runoff are usually only temporary losses on a small scale (the field being irrigated). Although quality may be degraded by fertilizers and other agricultural chemicals, water lost to deep percolation eventually moves into the water tables where it can be pumped and reused (see Figure 1). An exception to this is when it enters a salty, perched water table, usually making it unusable, or when it flows to the ocean. Runoff is often collected and reused on another field on the farm. Recognizing this and the fact that most California growers have become highly efficient in their irrigation management shows that there is limited opportunity to free up net water by improving application efficiency. Additionally, the use of California Irrigation Management Information System (see "Quantitative Irrigation Scheduling Does Work") data has allowed growers not to over-irrigate crops, minimizing the loss of water to deep percolation.

Generally a near-linear relationship exists between ET and crop production because transpiration, the movement of water vapor from the interior of the leaf to the surrounding atmosphere and the uptake of carbon dioxide, the basic building block required in the process of photosynthesis, both use the same plumbing at the leaf surface—the stomata. These are very small openings usually located on the undersides of leaves that regulate the movement of both water vapor and carbon dioxide. Indeed, it's often said that the plant trades water for carbon and if the goal is to maximize carbon uptake to achieve high yields, potential transpiration must be met. Thus, limiting transpiration (water stress) has usually been associated with production losses and lower grower profit.

While this is true for most field and row crops, it's not necessarily true for trees and vines. Lack of water (water stress) reduces the vegetative growth of plants but doesn't necessarily result in reduced fruit yield in trees and vines as it does with most field and row crops (cotton being an exception). Thus it is possible to reduce transpiration of trees and vines without reducing yield.

We have conducted RDI research on the major tree crops in California—pistachio, olive, prune, and citrus—and identified numerous species where significant amounts of water can be saved without having a negative impact on production or grower profit. We found that while the relationship between gross fruit yield (mean of three years) and applied water was fairly linear (see Figure 2a) relationship between gross revenue (\$/acre) and applied water was completely different (see Figure 2b). Many of the RDI regimes had higher gross revenue than the full irrigation control while applying from 4 to 8 inches less water. This was due to signifi-

Figure 1
Fate of Applied Irrigation Water



cantly lower creasing (higher fruit quality), especially with early season stress. This illustrates a major difference between row/field crops and tree/vine crops.

Almond trees present the best opportunity to couple RDI with adjusted horticultural management not only to reduce water consumption but also to address two critical health issues facing the industry—agricultural burning and dust during harvest. Again working in the southern San Joaquin Valley and supported by the California Almond Board, we tested various RDI regimes ranging from water savings of 15 to almost 50 percent of potential orchard ET. We showed that mild stress over most of the season can be imposed with little negative influence on production and substantial water savings. However, a potentially more significant finding involved the RDI regimes that imposed moderate to severe preharvest (April to July) stress. These strategies reduced vegetative growth (canopy size) and individual kernel weight but had no influence on fruit load; the smaller, more compact trees had higher fruiting density (nuts per unit of canopy volume) than fully irrigated trees. Thus, one could increase the planting density (trees/acre), thereby increasing total nut production (number/acre) compared with conventionally planted and irrigated trees. The downside is that fruit size would be lower, which may somewhat

decrease the value of the nuts. On the other hand, the need to prune trees would be much less, reducing the amount of prunings and burning.

Growers currently mechanically shake trees at harvest and leave the nuts on the ground to dry for 7 to 10 days before they are swept up. The sweeping and mechanical collection can create dust and related health concerns. Our research showed that preharvest stress can accelerate hull splitting, allowing for an earlier harvest, which benefits growers in a number of ways; earlier hull split allows the nuts to dry more completely on the tree prior to mechanical tree shaking. We believe that this presents the option of growers harvesting directly from the tree into nut catching machines, as is done currently in pistachio and prune orchards. This would eliminate the dust and other problems associated with nuts drying on the ground, such as ant damage and soil-borne bacteria infection.

Winegrapes is another crop where stress can substantially improve fruit quality. The irrigation of winegrapes was against the law in some European countries, such as Spain, until recently because of real or perceived negative irrigation-related impacts on wine quality. Some stress, however, is beneficial as it can reduce berry size, thereby increasing the ratio of skin to fruit volume. This is important to wine makers since the skin contains constituents important in wine color, taste, and chemical make-up.

Using our research and that of others and conservative estimates of current practices in orchards and vineyards, we have calculated a range of water savings for the major tree crops and winegrapes in California. These estimates are based on RDI regimes that do not reduce grower profits. One tree crop, walnuts, is excluded since we have no data showing that RDI can be successful although further research is planned. Water savings on the low end, those that we believe are currently achievable, total about 1 million acre-feet (see Table 1). If we include RDI adoption coupled with adjusted horticultural

Continued.

See "Regulated Deficit Irrigation" on page 9.

Figure 2
Production and Revenue Functions for Applied Water Using Mean 1998 - 2000 for Navel Oranges (Frost Navelar) in Southern San Joaquin Valley

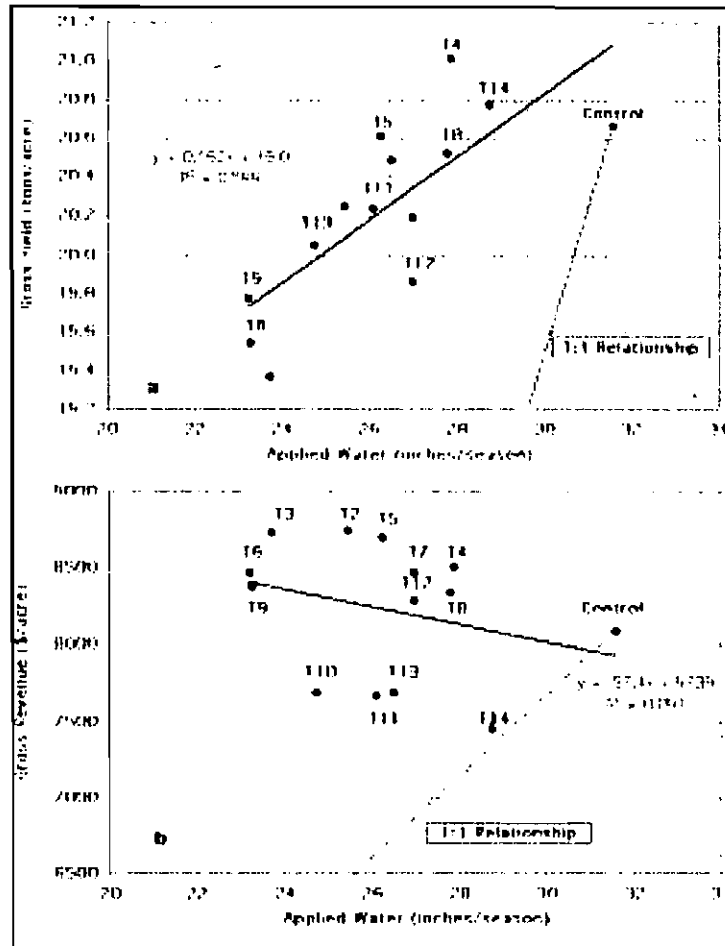


Table 1
Range of Estimated Water Savings Relative to Current Practices Using Regulated Deficit Irrigation

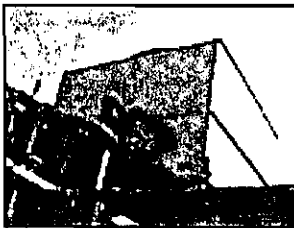
Crop	Bearing Acreage (acres)	Estimated Savings (inches)	Range of Water Savings (acre-ft)
Almonds	530,000	8 to 14	424,000 to 618,000
Winegrapes	480,000	8 to 12	320,000 to 480,000
Citrus	244,000	6 to 8	122,000 to 163,000
Pistachios	78,000	10 to 12	65,000 to 78,000
Prunes	76,000	6 to 12	38,000 to 76,000
Peaches	70,000	4 to 8	23,000 to 47,000
Olives	36,000	6 to 10	18,000 to 30,000
Apples and Pears	49,000	4 to 8	16,000 to 33,000
Walnuts	196,000	Unknown	Unknown
Total	1,759,000	52 to 84	1,026,000 to 1,525,000

Recycled Water Task Force Field Tour

By Fawzi Karajeh and Nancy King, Office of Water Use Efficiency

On January 7, 2003, members of the Recycled Water Task Force, as well as representatives from various water agencies, took a bus tour of a few Los Angeles, California facilities. The tour was organized by the Office of Water Use Efficiency. At the first stop, Earle Hartling, the LA Water Recycling Coordinator, led a tour of the wastewater treatment facilities including the 40-year-old groundwater recharge spreading fields of the Los Angeles County Sanitation District in Whittier. The system incorporates conventional tertiary treatment along with advanced treatment of nitrification and denitrification. One tour participant, Dan Carlson of the City of Santa Rosa Utilities Department, commented that it was beneficial to see how this Title 22 plant has been producing recycled water for a variety of use types.

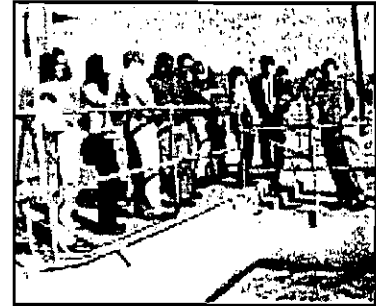
While on the bus traveling south to Irvine, Andy Hui of the Metropolitan Water District enlightened the participants with information regarding MWD's water recycling and



The Irvine's Opus 2 Building cooling towers fed by recycled water.

desalination efforts. Then at the next stop in Irvine, Marilyn Smith and Norris Brandt of the Irvine Ranch Water District greeted the group. The participants enjoyed a tour of the well-appointed dual-plumbed Opus 2 Building which allowed attendees to see how recycled water can be used in the flushing of toilets and urinals, and for cooling towers. Several participants were impressed with the use of recycled water in high-rise buildings. Diana Robles of the State Water Resources Control Board — Office of Water Recycling, commenting about the visit, said it "was very clear that there was no possibility of a cross-connection when the engineer explained to us what actually took place during the construction." Muriel Watson of the Revolting Grandmas, said "the thing that really attracted my attention was that this new city started off right and they're proud of the fact that they started out right . . . This is the direction I'd like to see us go." Watson was referring to the pipes that were labeled and restrooms that had signs informing visitors: "In the matter of conservation, we are using recycled water for flushing the toilets."

The final stop was in Fountain Valley at the Orange County Water District. There, Associate General Manager Bill Everest described Orange County's current and future work on recycled water advanced treatment



Earle Hartling, the Water Recycling Coordinator, speaks to participants at the wastewater treatment facility of the Los Angeles County Sanitation District in Whittier, California.

processes including the Groundwater Replenishment System. The group then toured Water Factory 21 and the new state-of-the-art GWR System's demonstration facilities, which include microfiltration, reverse osmosis, ultraviolet light and hydrogen peroxide disinfection systems. Participant Dan Carlson was enthusiastic about the Orange County recycled water work: past, present, and future. He said he was most impressed with their work, "not only what they're doing, what they've been doing so long, where they are headed, where the new project may take them, where I think most of us need to be in this industry in the future."

Regulated Deficit Irrigation

continued from page 7

practices, such as the higher almond density plantings and improved, more precise methods of identifying tree stress, we believe that 1.5 million acre-feet can be saved. We are currently conducting research on developing electronic sensors that can accurately detect tree stress thus allowing the management of RDI strategies with precision and without risks.

Today's farming economy has resulted in the steady conversion of relatively low-value row crop land into higher profit orchards and vineyards. This process only enhances the scale of potential RDI adoption. Achieving the promise of RDI depends on growers recognizing the benefits of managed water stress. This requires demonstrating on a large scale that RDI can be successful in their terms—profits are maintained or increased—and that the higher level of irrigation management required is within the ability of on-farm personnel. We believe that RDI in orchards and vineyards could be a key component in this state's effort to meet the growing demand for water and at the same time, preserve and protect permanent crop production.

EL RIEGO DE FRUTALES

Eliás Fereres

Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC y Univ. de Córdoba
Apartado 4084, 14080-Córdoba, España (ag1fecae@uco.es)

EL PROBLEMA:

¿CUÁNTA AGUA HAY QUE APLICAR?
(PARA MÁXIMA PRODUCCIÓN, CALIDAD Y BENEFICIO)

LA SOLUCIÓN ES EL PROBLEMA

Tú dame la receta: ¿Cuál es la Fórmula?

$$Kc = 0.16 + 0.8 Cs + 0.6 fw + 4 \times 0.75 F \times (1 - F) / ET_0$$

Kc: Coeficiente de cultivo mensual $ET = ET_0 \times Kc$

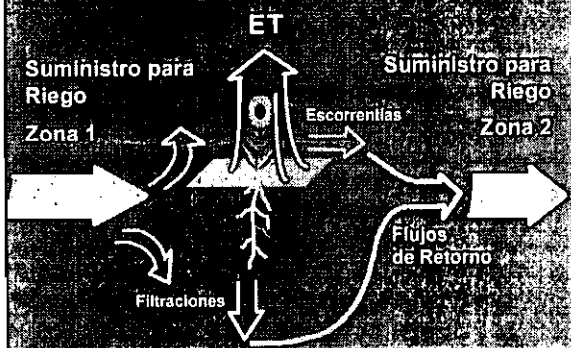
Cs: Cobertura del suelo (tanto por uno)

fw: fracción suelo mojado por el riego
(fw = 0, meses sin regar)

F: frecuencia de lluvias

$F = n / 30$ (n = nº días lluvia del mes)

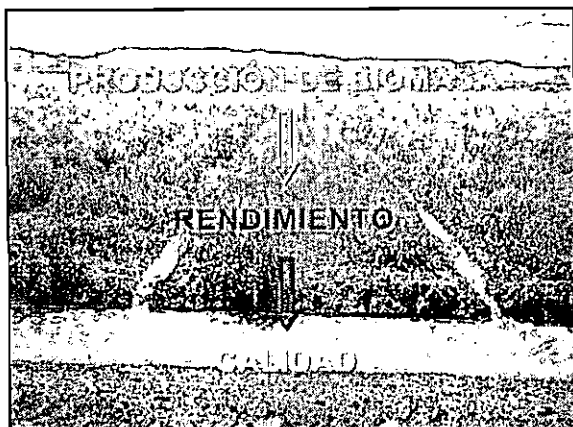
Uso del agua en el riego



¿Hacia dónde vamos?

BUENAS PRACTICAS AGRÍCOLAS (GAP)

1. Producir suficientes alimentos (nutritivos y sanos) de forma económica y eficiente.
2. Mantener y mejorar los recursos naturales.
 - Mantener la viabilidad de las empresas agrarias, contribuyendo a la sostenibilidad.
 - Responder a las demandas sociales y culturales de la sociedad.



FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

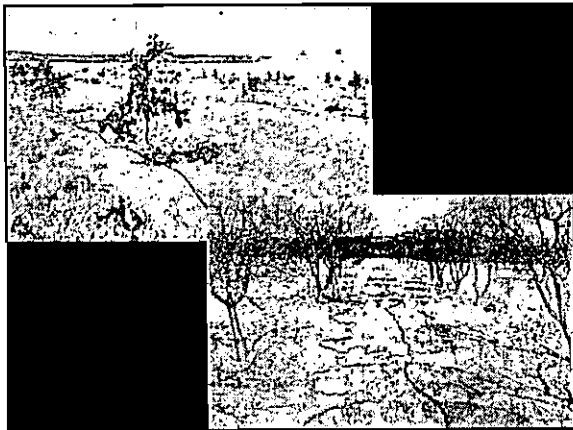
1. Productividad de un cultivo:

I. Relación entre radiación interceptada y acumulación de materia seca.

II. Procesos que determinan el rendimiento cosechable.

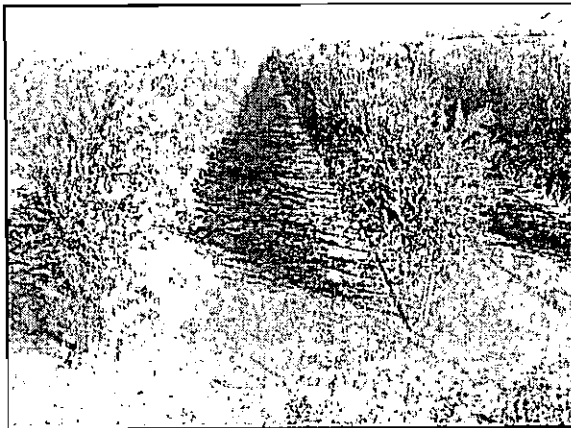
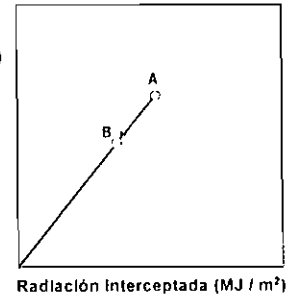
III. Relación entre producción de biomasa y agua.

IV. Relación entre rendimiento económico y agua.



Sensibilidad de la acumulación de biomasa a la reducción del crecimiento vegetativo

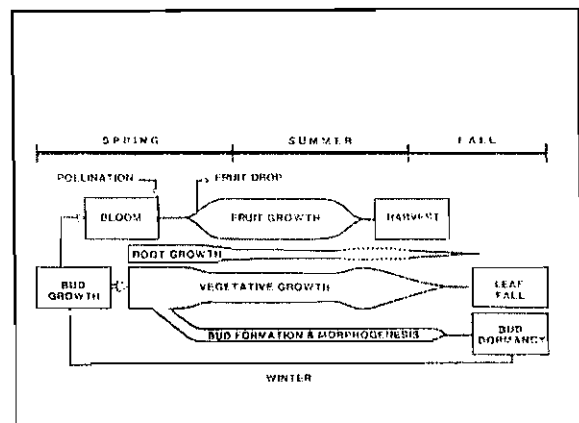
Reducción de Biomasa (T/ha)



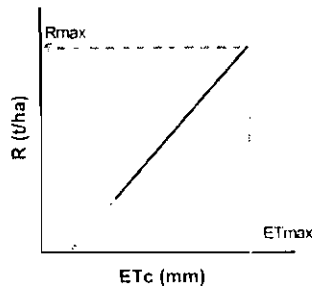
FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

1. Productividad de un cultivo:

- I. Relación entre radiación interceptada y acumulación de materia seca.
- II. Procesos que determinan el rendimiento cosechable.
- III. Relación entre producción de biomasa y agua.
- IV. Relación entre rendimiento económico y agua.

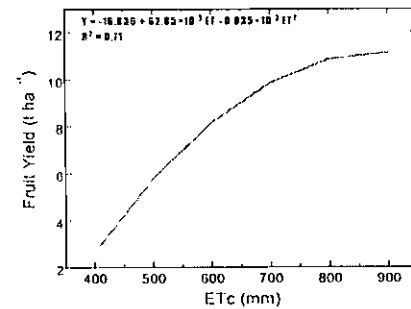


Función de Producción típica Cultivos Herbáceos

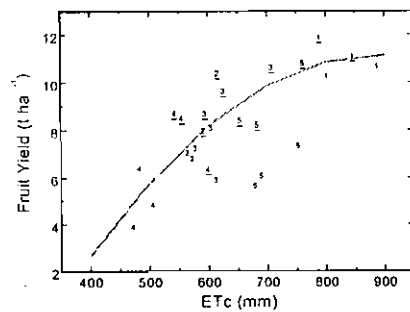


Función de Producción OLIVO; Córdoba, 1996-2000

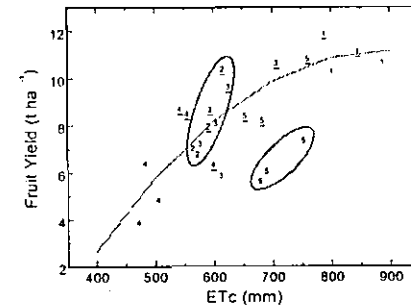
(Moriana et al., JASHS, 2003)



Función de Producción OLIVO; Córdoba, 1996-2000



Función de Producción OLIVO; Córdoba, 1996-2000



FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

2. El agua en el continuo suelo-árbol-atmósfera:

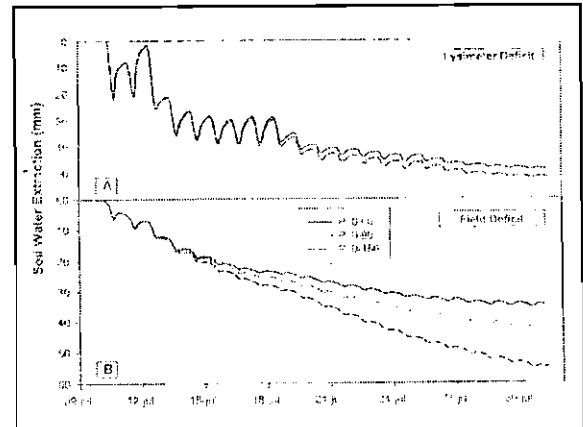
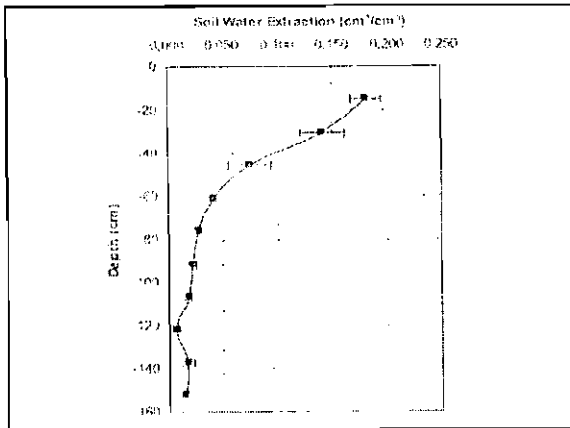
- Resistencias y Flujos.
- El agua en el suelo.
 - a) Estado y movimiento del agua en el suelo.
 - b) Límites de almacenamiento del agua: *capacidad de campo* y *punto de marchitez*.
 - c) Medida del agua en el suelo: limitaciones.

III. La transpiración y el comportamiento estomático.

- a) El proceso de transpiración: gradientes y resistencias.
- b) La conducción de agua a través del xilema.
- c) Funciones de los estomas
- d) Factores que regulan el comportamiento estomático.
- e) La ET de huertos frutales.

El suelo como
Almacén:
El objetivo es
que el déficit
de agua en el
suelo no
rebase el
Déficit
Permisible, pero:
¿Cuál es el
Déficit
Permisible?





FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

2. El agua en el continuo suelo-árbol-atmósfera:

- Resistencias y Flujos.
- El agua en el suelo.
 - Estado y movimiento del agua en el suelo.
 - Límites de almacenamiento del agua: *capacidad de campo* y *punto de marchitez*.
 - Medida del agua en el suelo: limitaciones.
- La transpiración y el comportamiento estomático.
 - El proceso de transpiración: gradientes y resistencias.
 - La conducción de agua a través del xilema.
 - Funciones de los estomas
 - Factores que regulan el comportamiento estomático.
 - La ET de huertos frutales.

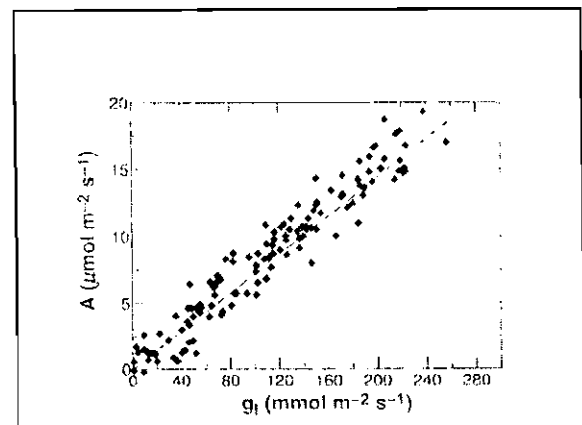
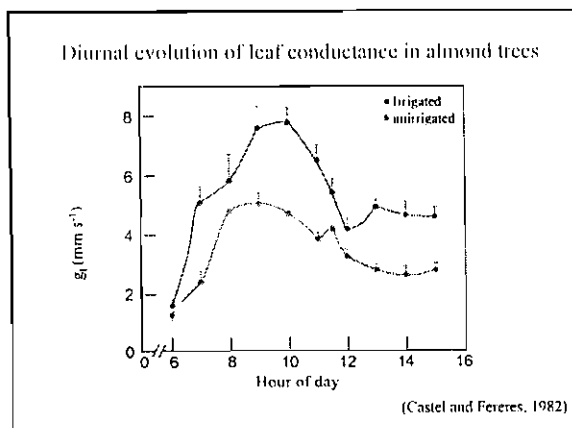
El flujo de agua a través del sistema suelo-árbol-atmósfera

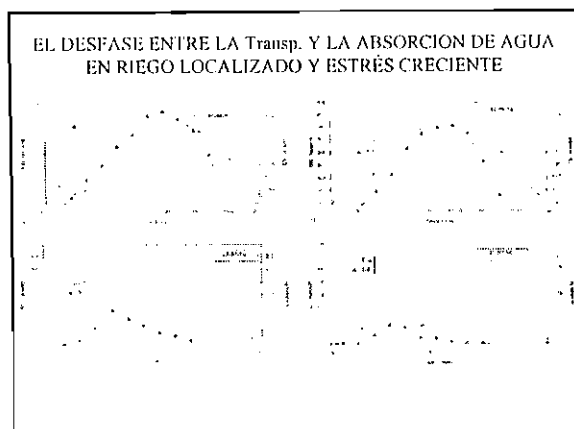
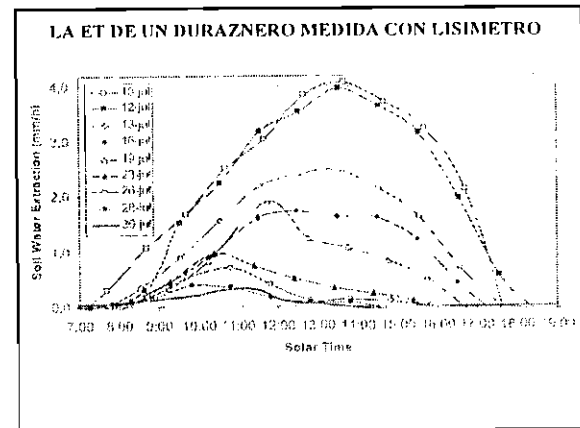
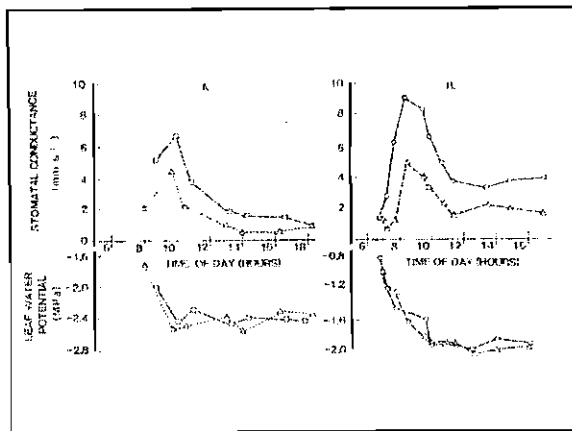
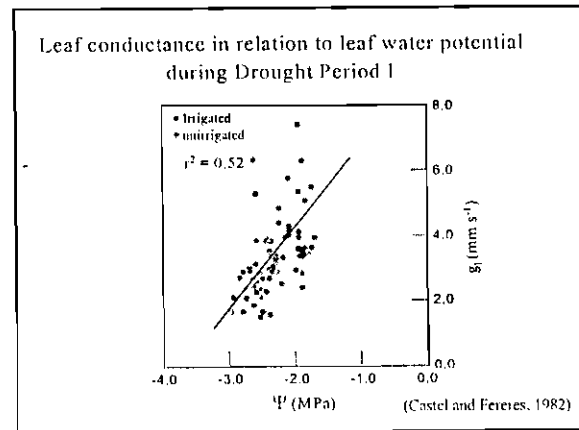
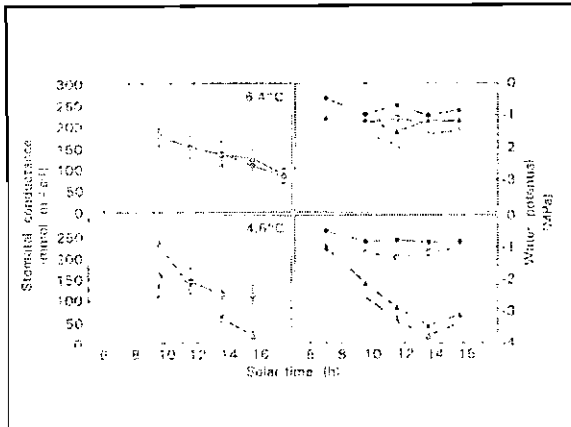
Fuerza motriz: gradiente de potencial hídrico

Resistencias en fase líquida:

- Del suelo a la superficie de la raíz.
 - De la raíz al xilema
- Del xilema a las cavidades subestomáticas.
 - De las cavidades al aire

Las resistencias más importantes son la resistencia estomática y la del aire; a nivel de huerto pasan a ser la resistencia de la cubierta (canopy) y la resistencia aerodinámica.



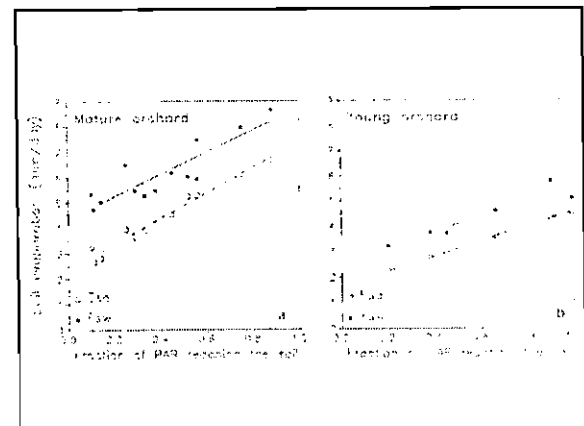
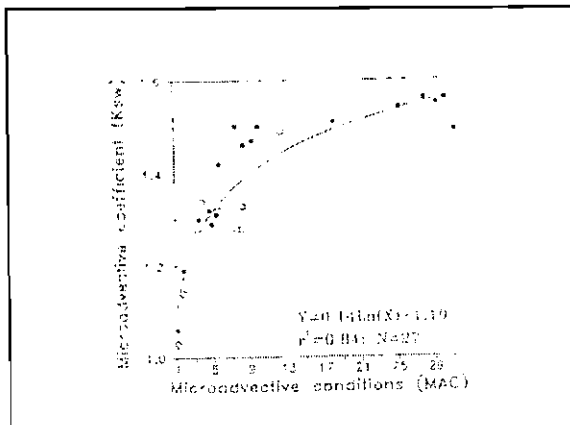
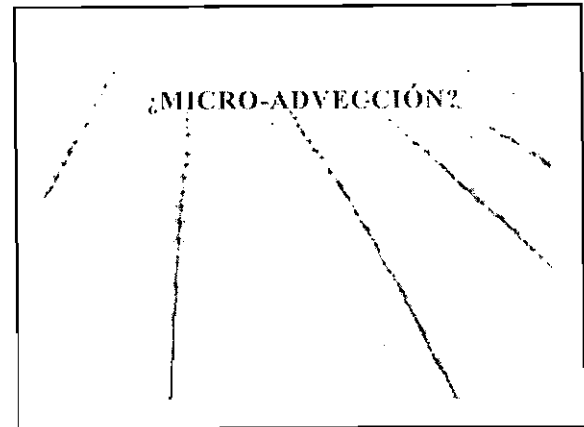
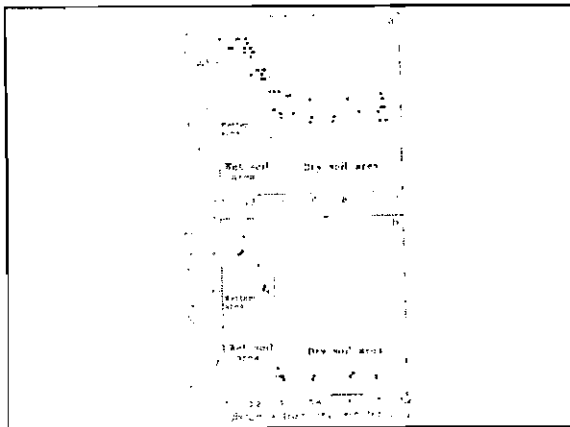
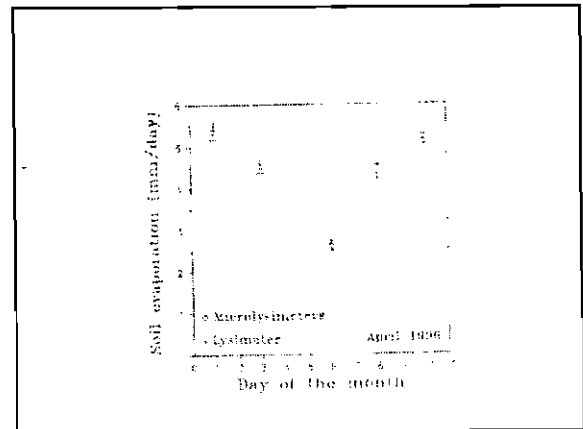
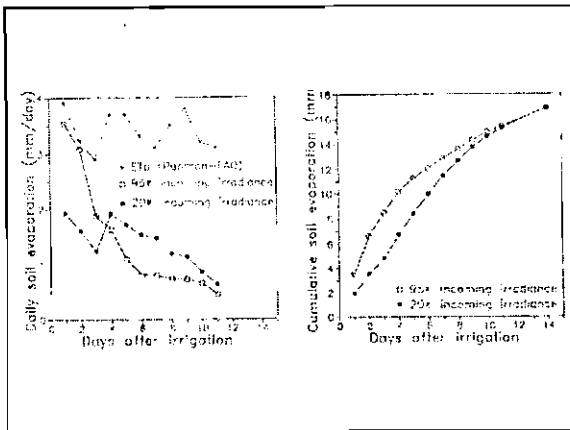


Necesidades hídricas de un huerto

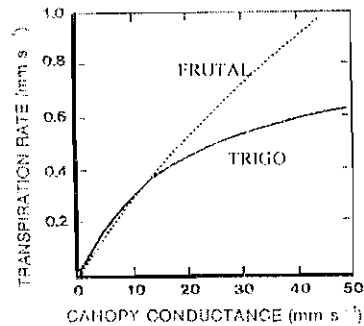
Cálculo de la evaporación desde el suelo y de la transpiración del árbol por separado.

El proceso de evaporación (E_s) en microriego:

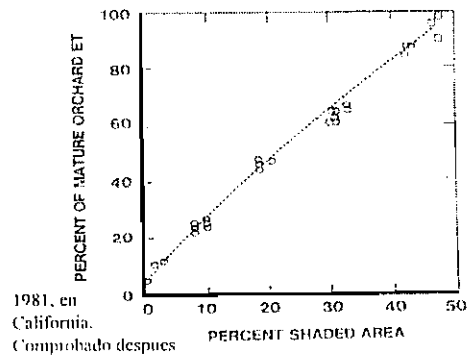
- *Es desde suelo sombreado*
- *Es desde suelo soleado*
- *Es desde suelo húmedo por el gotero*
- *Es desde suelo seco*



LA TRANSPIRACIÓN DEPENDE DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ESTOMAS



ENFOQUE EMPÍRICO: ¿CUAL ES EL K_F?



FUNDAMENTOS DEL RIEGO DE FRUTALES

IV El sistema radical: Estructura y funcionamiento.

- Funciones del sistema radical: anclaje, absorción, síntesis de reguladores de crecimiento y ¿sensores del estrés hídrico?
- Crecimiento de las raíces.
- Absorción de agua: patrones de absorción.
- Factores ambientales que afectan al crecimiento radical.

“Leaf responses are better described by soil water content than by leaf water potential”

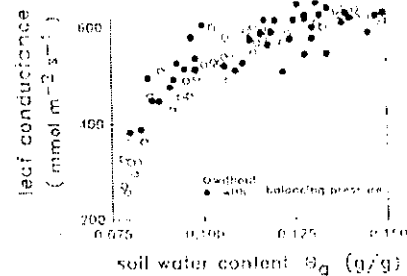
(Turner et al., 1985)

“A signal from roots experiencing dry soil is transmitted to the leaf so that water loss is reduced before the plant experiences water stress”

(Schulze, 1993)

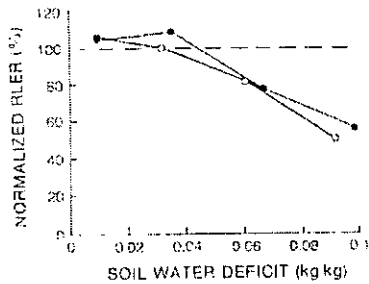
Conductancia estomática en relación al agua en el suelo

(Gollan et al., 1986)



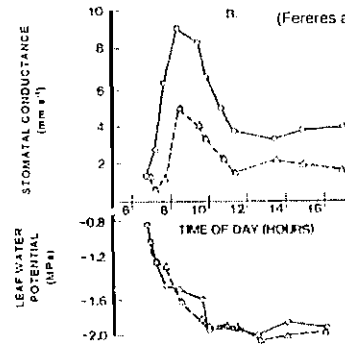
Tasa de expansión foliar frente al déficit de agua en el suelo

(Passioura and Gardner, 1990)

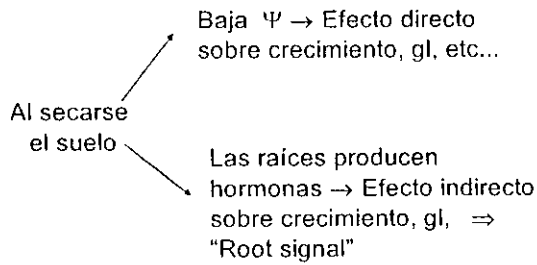


Conductancia estomática y potencial hídrico en primavera en melocotoneros regados y de secano. Winters, California, 1980

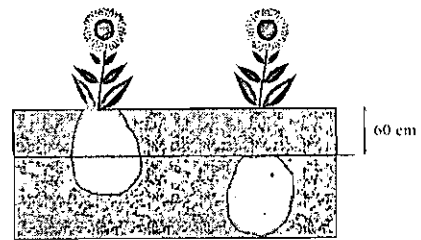
(Ferreira and Goldhamer, 1990)



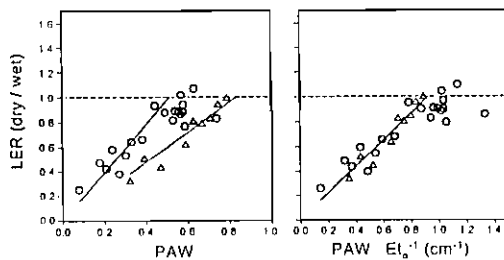
Respuesta al estrés hídrico



V.O. Sadras, F.J. Villalobos, and E. Fereres
Agronomy Journal 85:564-570 (1993)



Tasa de extensión foliar en relación a la reserva de agua disponible en el suelo



(V.O. Sadras, F.J. Villalobos, and E. Fereres, 1993)

Munns et al., 2000:

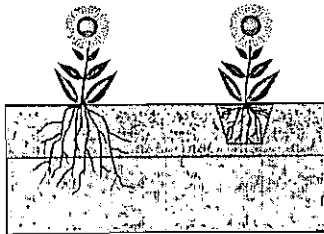
"Leaf water status can limit growth.... despite hormonal controls over the long term"

Davies et al., 2000:

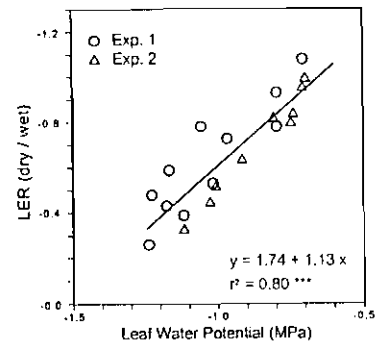
"Hydraulic signals": 124 cm

"Chemical signal": 21 cm

¿Control en la raíz o en la parte aérea?



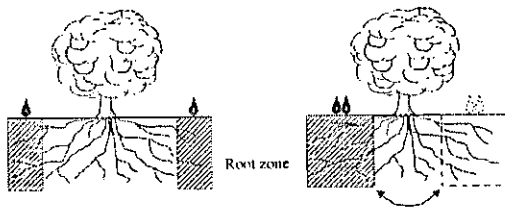
Relationship in sunflower between leaf expansion rate and leaf water potential



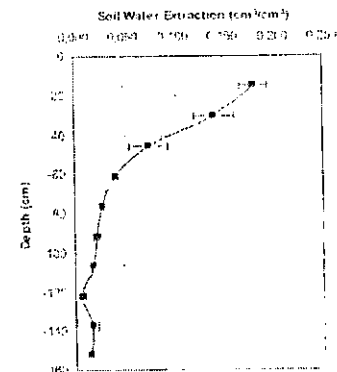
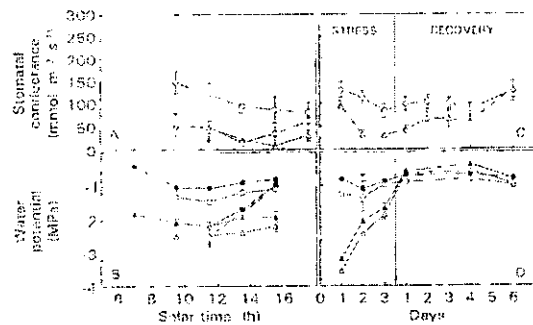
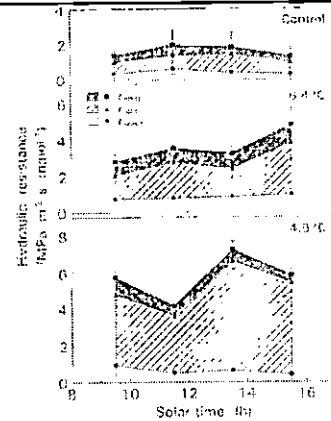
(V.O. Sadras, F.J. Villalobos, and E. Fereres, 1993)

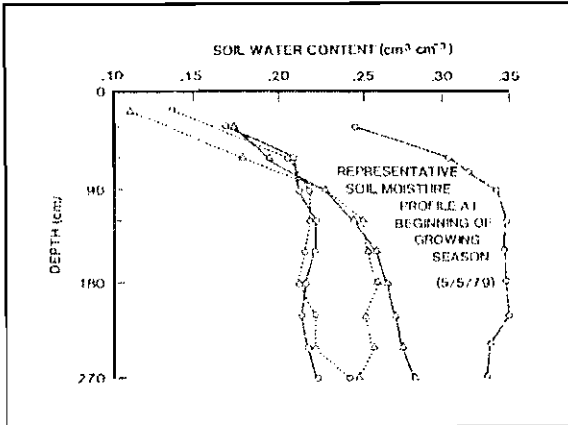
Deficit Irrigation

Partial Root Drying



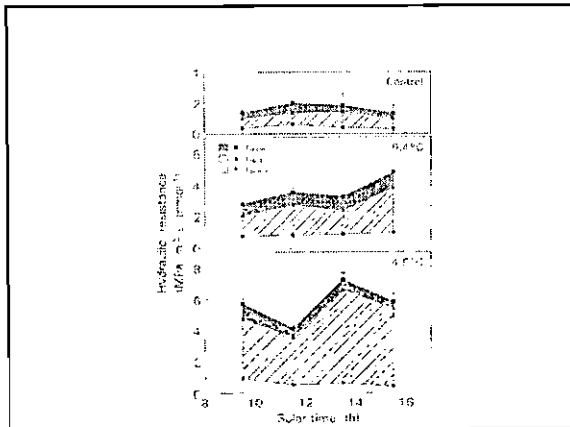
Can plants tell right from left?
(Maybe grapevines can!)





IV El sistema radical: Estructura y funcionamiento.

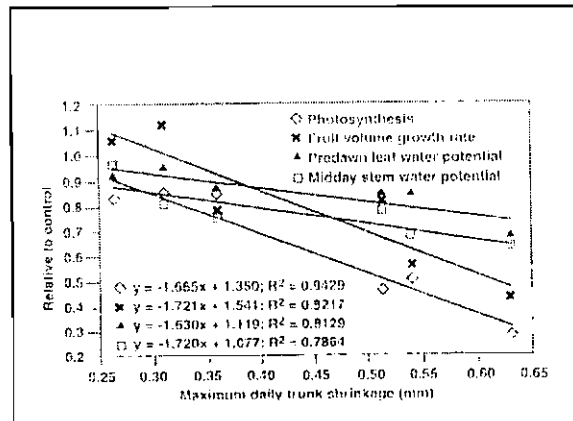
- a) Funciones del sistema radical: anclaje, absorción, síntesis de reguladores de crecimiento y ¿sensores del estrés hídrico?
- b) Crecimiento de las raíces.
- c) Absorción de agua: patrones de absorción.
- d) Factores ambientales que afectan al crecimiento radical.



TREE PROCESS OR PARAMETER	WATER STRESS LEVEL	
	MILD	SEVIRE
TRUNK GROWTH (-)	High	Low
YIELD (in-shell splits) (-)	High	Low
SHOOT LENGTH (-)	High	Low
BLANKING & ABORTION (+)	Low	High
SHOOTS/TREE (-)	High	Low
SHELL SPLITTING (-)	High	Low
LEAF SIZE (-)	High	Low
CLUSTERS/TREE (-)	High	Low
NUTS/TREE (-)	High	Low
HARVESTABILITY (-)	High	Low
NUT WEIGHT (-)	High	Low
NUT SIZE (-)	High	Low

3. Respuestas de los cultivos al déficit hídrico:

- I. El crecimiento vegetativo.
- II. Los procesos de floración y fructificación.
- III. La conductancia estomática.
- IV. La senescencia foliar.
- V. Los efectos interanuales de la sequía.
- VI. La recuperación de la sequía.



I. RIEGO SUPERFICIAL

Profesor Eduardo A Holzapfel
Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola

El riego superficial es el método de riego más antiguo y el más comúnmente usado. Existen en el mundo, a la fecha, alrededor de 250 millones de hectáreas bajo riego y un 98% de ellas o más se riegan con métodos de riego superficiales. De éstas, un alto porcentaje utiliza técnicas poco adecuadas. En frutales esta tendencia general es menos acentuada, pero está presente. Es de esta manera que cualquier esfuerzo por mejorar el riego, requerirá enfocar el problema hacia el riego superficial. En el último tiempo ha adquirido una gran importancia debido a los elevados costos de energía involucrados en los métodos de riego presurizados y en la incorporación de distintos niveles de automatización en los métodos superficiales (Holzapfel et al., 1998). El riego superficial posee diversos factores y elementos de diseño, los cuales han sido analizados en forma extensa (Walker et al., 1987). Su principio básico es que el agua es introducida al campo en el punto más alto, fluyendo hacia los sectores más bajos en la medida que se infiltra en el suelo a través del avance (Holzapfel et al., 1998).

El riego superficial se puede realizar de varias maneras. Las clasificaciones de los métodos de riego superficiales varían substancialmente, debido a que las diferencias entre los distintos tipos de riegos involucra el manejo de varios conceptos y complejas definiciones (Walker et al., 1987). Holzapfel et al. (1998) menciona los tres tipos de métodos de riego superficial más frecuentemente usados: (1) regueras en contorno, (2) riego por bordes, y (3) riego por surcos. De estos métodos, el riego por surcos y por bordes son los de mayor importancia en el riego de huertos y cultivos. (Holzapfel et al., 1998).

El riego por surcos.

El riego por surcos consiste en la aplicación de agua por medio de pequeños regueros o surcos que se construyen entre las hileras de los cultivos y/o frutales (Elliot et al., 1982). El agua es introducida en la cabecera de los surcos, avanza hacia cotas inferiores y se infiltra a través del perímetro mojado, moviéndose vertical y lateralmente hasta saturar el suelo (Walker et al., 1987). La Figura 1 muestra riego por surcos en frutales.



Figura 1. Riego por surco en frutales.

Fases del riego por surcos.

En general, el riego por surcos está caracterizado por 4 fases: Avance, Almacenamiento, Vaciado y Recesión (Holzapfel, 1992). La Figura 2 muestra un esquema de las fases del riego superficial.

Durante la fase de avance, el agua se desplaza a lo largo del surco hacia el extremo inferior hasta llegar al final de éste, comenzando la fase de almacenamiento que termina con el corte del abastecimiento de agua hacia el surco. La fase de vaciado, también llamada de recesión vertical, comienza al cortar la entrada de agua al surco y termina cuando la altura del agua en cualquier parte de él se reduce a cero. Finalmente, la fase de recesión comienza al final del vaciado y termina cuando el agua desaparece totalmente de la superficie del suelo a lo largo de todo el surco (Essafi, 1983).

La diferencia en tiempo entre la curva de avance y de recesión se conoce como tiempo de oportunidad de riego.

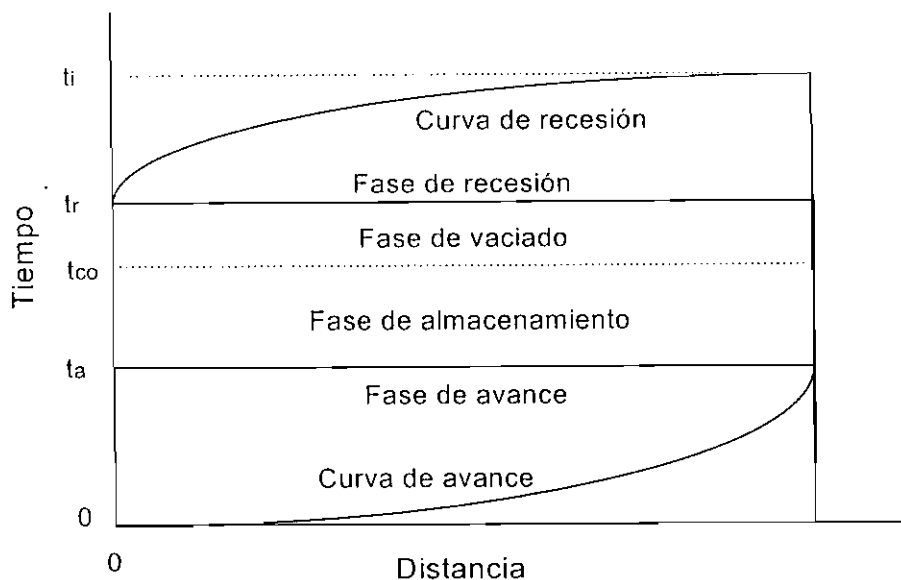


Figura 2. Diagrama esquemático de las fases del riego superficial; t_a = tiempo completo de avance, t_{co} = tiempo de corte, t_r = tiempo de comienzo de recesión, t_i = tiempo de completación del riego. (Holzapfel, 1992)

CONSIDERACIONES SOBRE MANEJO DE RIEGO SUPERFICIAL

En general, los métodos de riego superficiales tecnificados pueden idealmente suplementar los requerimientos de agua de los frutales con eficiencias de hasta un 70 a 85% (Williardson, 1972; Meriam y Keller 1978; Holzapfel, et al, 1985). Estudios que se han efectuado en diferentes países indican eficiencias típicas que fluctúan entre 10 a 40% (Valenzuela y Peña, 1960; Bos y Nutgeren, 1974; Clyma et al, 1975; Druse y Herman, 1977). Enormes pérdidas de agua, salinización del suelo y saturación del perfil son los efectos que producen los excesos de aplicación de agua (Pereira et al, 1979). Una pobre distribución y riego inadecuado en períodos de alto consumo de agua dan como resultado un estrés del frutal provocando una reducción en la producción).

Muchos años de investigación han permitido desarrollar adecuados procedimientos y técnicas en riego superficial. Sin embargo, la gran mayoría de la superficie utiliza aún prácticas muy antiguas.

Muy poco del avance científico y el conocimiento tecnológico ha sido exitosamente transferido al terreno, por ello el vacío que existe entre el conocimiento y el uso de él en el área de riego sigue siendo enorme. Si se quiere realmente efectuar un impacto en el mejoramiento del manejo del agua en los frutales a nivel predial, debe construirse un importante puente entre el conocimiento y el uso.

ANTECEDENTES GENERALES

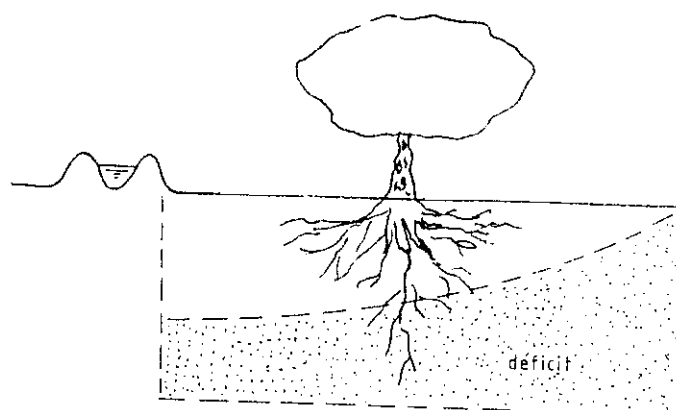
Los métodos de riego superficiales tienen ciertos principios básicos comunes. El agua es introducida al campo en el punto más alto, fluyendo hacia los sectores más bajos en la medida que el agua se infiltra en el suelo a través de su avance. Se puede asumir que una buena uniformidad de distribución podría ser imposible de obtener bajo esas condiciones porque, inevitablemente, entrará más agua en la cabecera (inicio del surco o platabanda) que al pie (final surco o platabanda). Aunque es esta una tendencia, es posible minimizar la desuniformidad y obtener eficiencias de distribución con riego superficial comparable a los de riego presurizado. Esto se puede lograr dividiendo el sector a regar en unidades de tamaño apropiado, aplicando tiempos de riego acordes con el tipo de suelo y la profundidad radical y regulando el caudal a aplicar de acuerdo con la pendiente del suelo y el tipo de cultivo entre las hileras del frutal.

Tiempo de aplicación del agua : El responder a la pregunta: ¿a qué tiempo se debe cortar el agua en la cabecera?, implica el conocimiento del Tiempo de Riego (TR) y el manejo del concepto de caudal máximo no erosivo y caudal reducido.

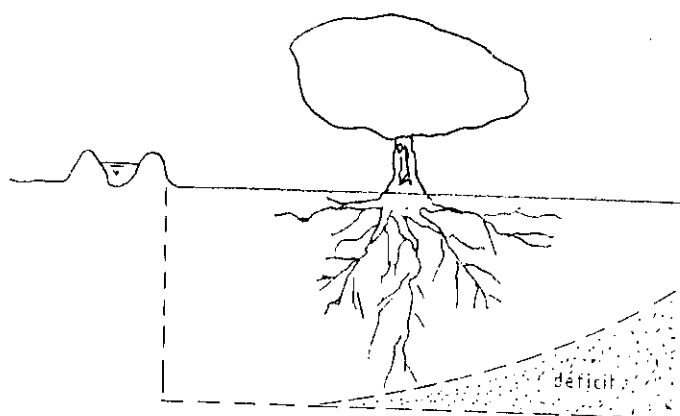
Resulta evidente que para cubrir totalmente el déficit de agua a lo largo del surco, éste deberá permanecer con agua por lo menos el tiempo de riego (TR) que ha sido obtenido de la ecuación de infiltración acumulada.

Si consideramos tres situaciones técnicas (Fig. 3):

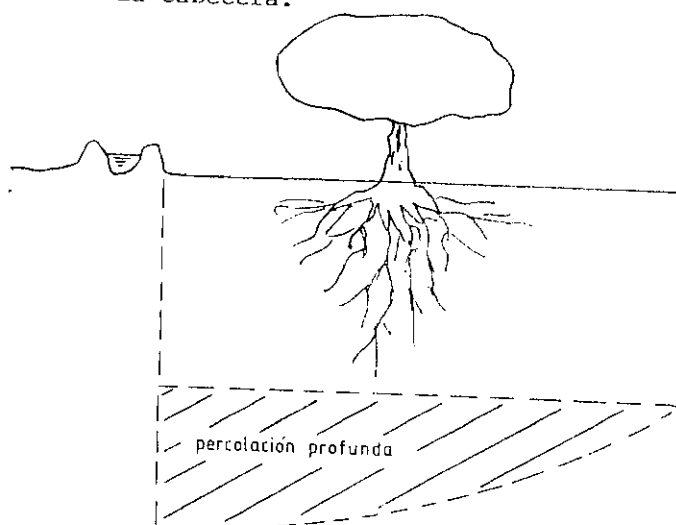
1. El tiempo de aplicación se establece que será igual al que demora el agua llegar al final del borde o surco. Debe considerarse, además, que el agua desaparece con cierta rapidez en el surco o borde cuando cesa el aporte de agua.
2. Se continúa aplicando el agua hasta completar el tiempo de riego TR en la cabecera (inicio del surco). También se asume una rápida desaparición del agua en el surco o borde.
3. El tiempo de aplicación considera completar el tiempo de riego en todo el surco o borde; se considera además, la desaparición Inmediata del agua.



a. El agua se corta apenas llega al final.



b. El agua se corta completando el tiempo de riego en la cabecera.



c. Se completa el tiempo de riego en toda la longitud.

FIGURA 3. Tiempo de aplicación y distribución de agua.

Como conclusión de lo ya señalado, es claro que si deseamos regar en forma óptima, en todo el surco o borde debe permanecer el agua un tiempo tal que permita infiltrar el total de la lámina calculada como déficit. Este tiempo no es otro que el tiempo de riego.

Por tanto, y como primera aproximación, al regar debemos procurar que el tiempo de aplicación (T_a) del agua corresponda al tiempo de riego (T_R) más el tiempo que demora el agua en llegar al final del surco o borde (T_f).

Esto, escrito en forma matemática, es: $T_a = T_R + T_f$

Para las personas que se encuentran regando, les resulta un tanto difícil continuar la aplicación del agua una vez que se ha completado el tiempo en que el agua llega al final del curso. Esto, porque dicha práctica implicaría una excesiva pérdida de agua por escurrimiento a los pies del surco. Una manera de evitar estas pérdidas es reducir el caudal de aplicación a un caudal reducido (Q_r), que es posible calcular. Esto porque se debe considerar que el caudal reducido debe satisfacer, a lo menos, los requerimientos de infiltración a lo largo del surco o borde. De esto se desprende que el " Q_r " debería ir cambiando en el tiempo, reduciéndose cada vez más a medida que transcurre el riego. Sin embargo, para efectos prácticos, se recomienda que el caudal reducido corresponda a un valor que oscile entre $1/4$ y $1/2$ del caudal máximo ($Q_{\text{máx}}$), es decir:

$$Q_r = 1/4 Q_{\text{máx}} \text{ o } Q_r = 1/2 Q_{\text{máx}}$$

De esta manera se evitan las pérdidas por escurrimiento y se asegura un abastecimiento adecuado de agua.

El uso del caudal reducido se complica por la forma del manejo tradicional del riego por surcos o bordes que consiste en una abertura en la reguera de cabecera, lo cual dificulta el control sobre el caudal reducido. Si se utiliza algún sistema de aducción como sifones, tubos

rectos, o sistema de baja presión, el procedimiento es bastante simple. En el caso, de utilizar sistema de aducción presión o californiano, sólo es necesario regular la válvula de huerto.

Un aspecto importante de destacar y considerar, es determinar el tiempo de recesión, Este se define como el tiempo que demora el agua en desaparecer a lo largo del surco o platabanda una vez que se ha dejado de aplicar el agua. La experiencia indica que, especialmente en bordes y en suelos más arcillosos, con pendientes inferiores al 1%, el tiempo de recesión tiene relativa importancia en la determinación del tiempo de aplicación. Así, se ha observado que en la cabecera el agua puede demorar cinco a diez minutos en desaparecer en tanto que al final se han determinado tiempos de recesión de 60 minutos y más, dependiendo este valor del largo y pendiente del borde, del caudal aplicado, y de si al final el borde tiene o no salida. En surcos, el tiempo de recesión es menos importante, siendo su valor en general inferior a los 20 minutos. Esto en atención a que los surcos se utilizan normalmente con desagües al pie y que el agua acumulada en la superficie es mucho menor.

Por tanto, si el tiempo de recesión (T_r) es de relativa importancia, se recomienda adelantar el tiempo de corte (disminuir el tiempo de aplicación) en el mismo valor del " T_r ". Esto puede expresarse como:

$$\text{Tiempo de aplicación } (T_a) = T_R + T_f - T_r$$

De esta manera, el perfil de humedecimiento de suelo logrado, es más homogéneo, disminuyendo así las pérdidas por percolación profunda y escurrimiento, tal como se muestra en la figura 4.

Existen diferentes metodologías propuestas por diversos autores, para determinar en forma teórica el T_r . Sin embargo, la mejor determinación de " T_r " es aquella realizada por observación experimental en terreno.

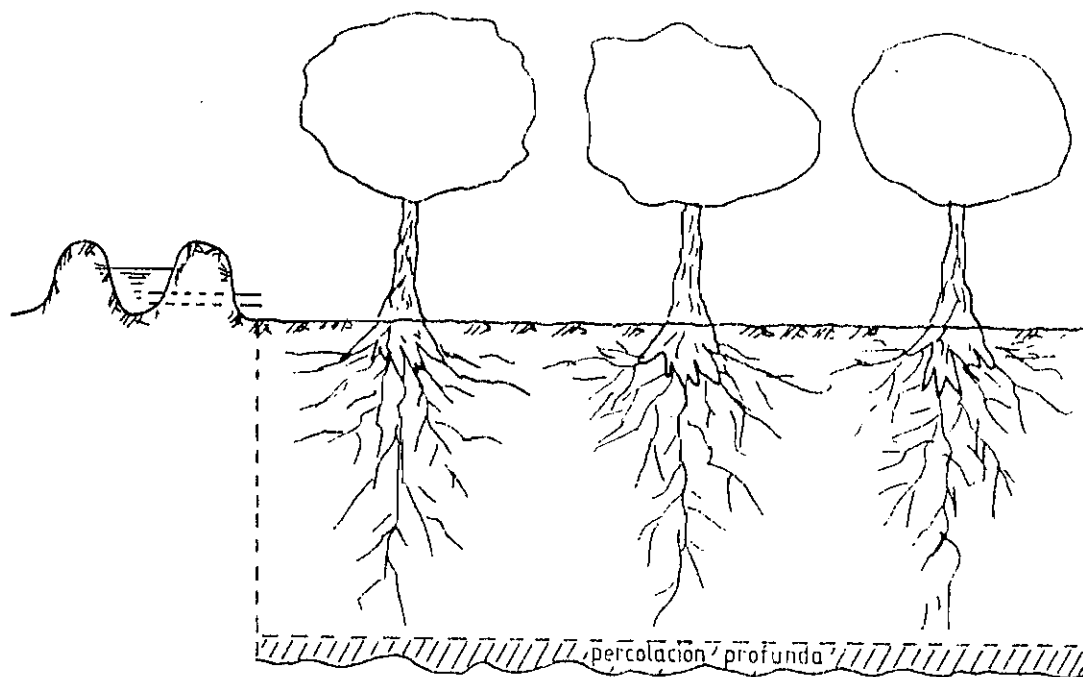


FIGURA 4. Perfil de humedecimiento a lo largo de un surco (o borde) al considerar el tiempo de recesión.

Para determinar cuando el agua ha desaparecido en los diferentes tramos de surco, se recomienda adoptar el criterio de cese del movimiento de agua en una cierta longitud, un metro por ejemplo. Además, se ha comprobado que el ese del movimiento de agua en el surco, o bien, el desaparecimiento por infiltración, es gradual en la primera mitad del surco y de similar ocurrencia en el último tercio.

A manera de ejemplo: determinar el tiempo de aplicación del agua a un surco, si el $TR = 92$ minutos, el tiempo final, $Tf = 37$ minutos y el agua se demora 5 minutos en desaparecer en la cabecera y 20 a los pies del surco.

$$T. \text{ aplicación recomendado} = TR + Tf - Tr$$

$$Ta = 92 + 37 - 20 = 109' \text{ minutos}$$

De este modo, el agua estuvo en la cabecera 114' y al final 92'.

RIEGO POR SURCOS

Entre los factores a considerar en el manejo del riego por surcos, se mencionan : Consideraciones de suelo e infiltración y forma, salinidad, erosión, entrega del agua, especie vegetal, fertilización y control de plagas.

1. Condiciones de suelo e infiltración.

Cuando el agua es aplicada al surco, ésta posee un movimiento bidimensional. Además, del avance superficial, existe la infiltración vertical y movimiento lateral en el suelo. La velocidad de infiltración (VI) es alta al inicio del proceso para, posteriormente, decrecer hasta alcanzar una tasa de infiltración relativamente constante (Velocidad de Infiltración básica) y esta VI se encuentra influenciada por el tipo de suelo en el cual se construyó el surco. Además, la forma y el desarrollo que adquiere el bulbo de humedecimiento está estrechamente ligada a características del perfil del suelo, tal como se indica a continuación (figura 5).

2. Espaciamiento y forma del surco.

Usualmente, el espaciamiento entre surcos está dado por el cultivo, suelo y maquinaria usada para las labores de manejo. En suelos arcillosos, el espaciamiento entre surcos (1.0 – 1.5 m) puede ser mayor que en suelos arenosos (0.5 – 1.0 m), debido a la forma del bulbo de humedecimiento. En suelos arcillosos, como una manera de aumentar el volumen de agua infiltrada, es recomendable utilizar surcos anchos de gran perímetro. En cambio, en suelos arenosos, es recomendable tener un mayor número de surcos para lograr un adecuado traslape de humedad, en el primer año de plantación, es suficiente un surco individual que forme una taza alrededor del árbol.

Durante los primeros tres o cuatro años después de la plantación, se puede utilizar un sistema con dos surcos : uno de cada lado de la hilera. Posteriormente, se requiere un arreglo de cuatro surcos que puede ser suficiente para plantaciones de 5 x 5 metros. Estas recomendaciones están dadas para surcos rectos, que son los habitualmente –y a veces único tipo- usados en plantaciones frutales.

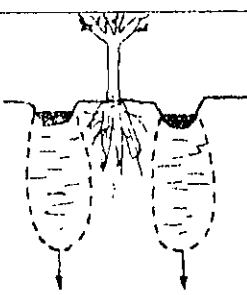
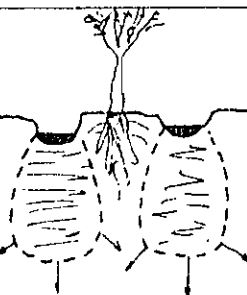
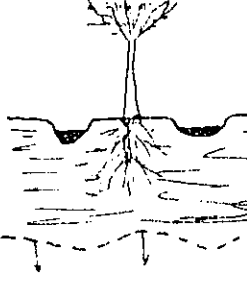
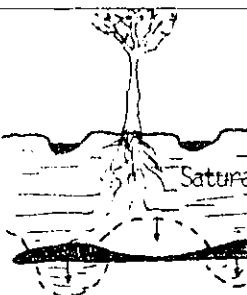
Perfil del suelo hasta 2 metros	Descripción del perfil	Patrón de humedad	Recomendaciones
	Profundo, muy permeable, arenoso o turboso.		Movimiento lateral insuficiente de la humedad para colocar riego por surcos.
	Profundo, areno-arcilloso o franco-permeable. Riegos de 0.5 a 3 horas.		Recomendable para riego por surcos, pero requiere técnicas de aplicación especial cuando el tiempo de riego excede en una hora.
	Suelo arcilloso o franco con permeabilidad decreciendo gradualmente.		Ideal para riego por surcos.
	Cambio abrupto desde un suelo superficial de baja permeabilidad a un subsuelo muy permeable.		Este suelo almacena más agua que la esperada. La interfase retrasa el movimiento en profundidad y aumenta el almacenamiento.

FIGURA 5. Efectos del perfil de suelo en la distribución de humedad del riego por surcos (Marr, J.C., 1967).

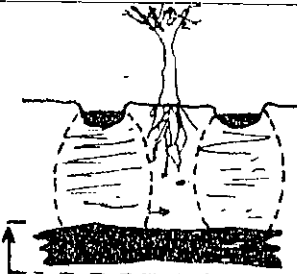
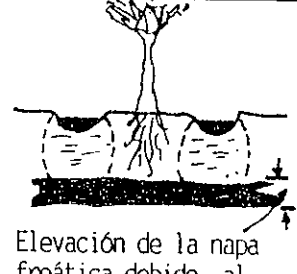
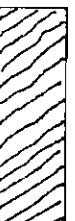
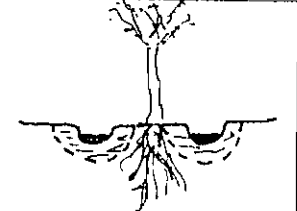
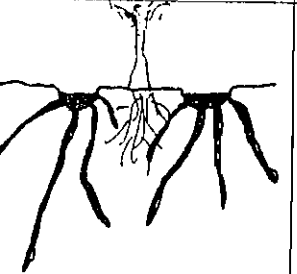
Perfil del suelo hasta 2 m	Descripción del perfil	Patrón de humedad	Recomendaciones
 Posición original permanente de la napa.	Suelo arcilloso o franco potencialmente salino en la superficie con un nivel freático en 1.5 y 2.0 m desde la superficie. Drenaje pobre del subsuelo.	 Elevación de la napa debido al riego.	No recomendable para riego superficial. Drenaje artificial soluciona el problema.
 posición original permanente de la napa.	Suelo arcilloso o franco potencialmente salino entre 1 a 1.2 m, con un nivel freático a pocos cm sobre un subsuelo con grava y arena pobremente drenado.	 Elevación de la napa freática debido al riego.	Muy peligroso para riego por surco. Pequeños aumentos del nivel freático pueden provocar aumentos en la concentración de sales de la superficie.
	Suelo muy compactado y profundo.		Penetración de agua insuficiente para un riego exitoso.
	Suelo agrietado. Velocidad de infiltración alta, suficiente para cubrir requerimientos.		Las grietas permiten un humedecimiento profundo del suelo.

FIGURA 5. Continuación.

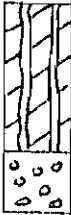
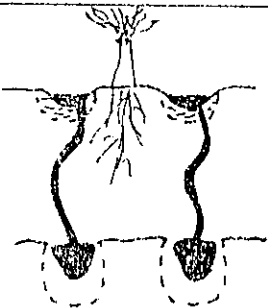
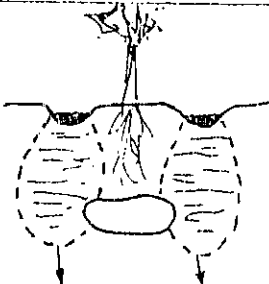
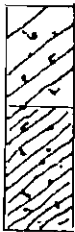
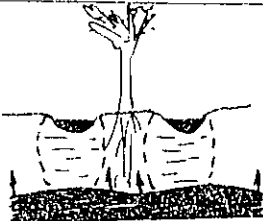
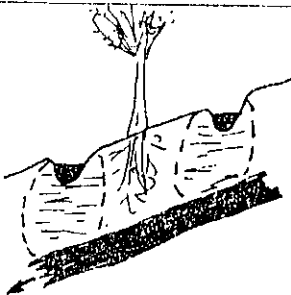
Perfil del suelo hasta 2 m	Descripción del perfil	Patrón de humedad	Recomendaciones
	Suelos especiales que presentan grietas y galerías hechas por roedores.		El agua almacenada en el suelo puede ser menor que la esperada. Se pierde agua hacia el subsuelo. No apto para riego superficial.
	Suelo con alguna interfase excepcional de tipo arenisca o grava.		El total de aporte a la raíz de la planta es insuficiente. Destruir la interfase a través del subsolado.
	Suelo superficial permeable y potencialmente salino, con un subsuelo compacto. Sin drenaje subsuperficial.		No regable excepto para arroz o si se realiza drenaje subsuperficial.
	Suelo en que la pendiente permite drenaje.		Posible para riego por surcos.

FIGURA 5. Continuación.

Para reducir la compactación el suelo por tráfico de maquinaria, los surcos deben estar apartados tanto como sea posible de la zona de paso, permitiendo el desarrollo de vegetación en ese lugar. Esto reducirá la compactación del suelo al permitir que se mantenga seco el sitio de tránsito (Figura 6).

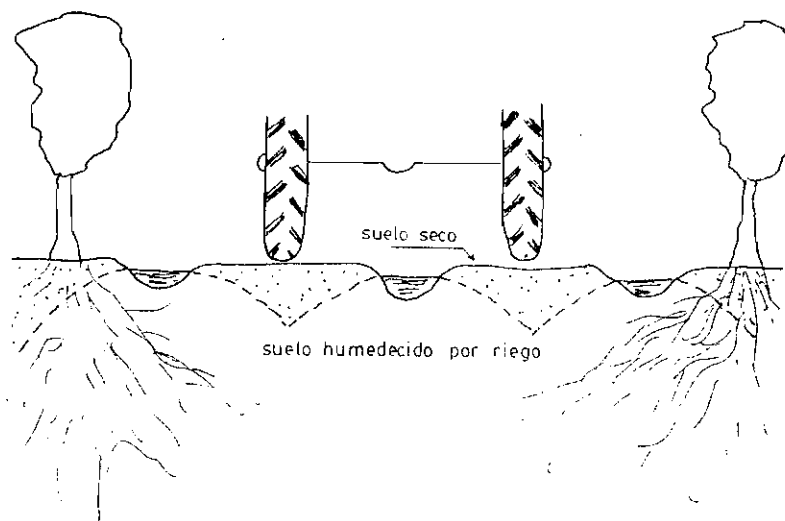


FIGURA 6. Disposición de los surcos y tráfico de maquinaria.

La confección de los surcos debe hacerse con cepones, cuyas dimensiones y formas deben guardar relación con el tipo de surcos que se desea establecer. Deben evitarse implementos que realicen un sellamiento o compactación del surco al remover el suelo, y el contenido de humedad debe ser el de condición de friabilidad, para evitar la formación de terrones. En los casos en que el agua de riego transporte un exceso de partículas en suspensión, las cuales al sedimentar en el surco provocan una disminución de la infiltración, deberá utilizarse en forma periódica cultivadores para dispongan del suelo.

El control de las malezas que crecen en el surco puede realizarse rehaciendo el surco con cepones o bien utilizando la siega o herbicidas de contacto, lo cual posibilita un aumento de la infiltración al no alterarse la estructura del suelo.

3. Salinidad.

Cuando el riego por surcos es utilizado bajo condiciones de salinidad y alcalinidad, el movimiento lateral del agua en el suelo, acompañado con la evaporación superficial, provoca concentraciones de sal en el sector entre los surcos. Estas sales pueden causar daños graves a aquellas plantas sensibles a la acción de la sal.

La eliminación de sales se debería realizar preferentemente a través de aplicaciones invernales de riego por aspersión con baja velocidad de aplicación, o mediante aplicación de pequeñas láminas de agua superficiales e intermitentes.

4. Erosión.

La pendiente del suelo y el caudal aplicado son dos factores que pueden afectar la erosión del suelo. Un caudal es erosivo cuando en los primeros tramos del surco se observa arrastre de partículas en el fondo del surco, o bien un desmoronamiento de las paredes.

La erosión del suelo es una limitación importante en el uso del riego por surcos, debiendo diseñarse el sistema de modo que evite o disminuya la velocidad del agua. Pendientes del suelo mayores al 0.5% deben considerar ciertas precauciones en el caudal a aplicar, siendo la pendiente máxima permisible del surco del orden del 1%.

En suelos con baja pendiente, resulta conveniente aprovechar el exceso de agua que alcanza los extremos del surco derivándola hacia los surcos adyacentes y permitiendo que retroceda. De este modo, se logra un perfil de humedecimiento más homogéneo a lo largo del surco. Sin embargo, en suelos con pendientes mayores al 0.3%, esta práctica no resulta conveniente, debiendo utilizarse un desagüe a los pies del surco.

5. Entrega del agua.

La forma de derivación del agua al surco está íntimamente relacionada con el grado de "cultura del riego" existente y por aspectos económicos. Surcos largos posibilitan el uso de sistemas de aducción de mayor costo, así como un uso intensivo de maquinaria requiere de cabeceras que no dificulten el tránsito. Un valor alto del suelo sugiere también un

aprovechamiento máximo de la superficie evitando zonas muertas en la cabecera y el pie. El uso de aberturas en la reguera frente a cada surco, usando pala, además de entorpecer el paso de maquinaria, impide regular el caudal que se aplica. En cambio, los sifones y orificios sumergidos con acequia nivelada, permiten regular el caudal, pero se mantiene el problema de tráfico o pérdida de una gran franja de suelo. La manga plástica elimina ambos inconvenientes, pero existe el problema de roturas y duración, con el consiguiente aumento del costo. El sistema de baja presión o californiano - permanente o móvil - posee el inconveniente de los costos que pueden resultar prohibitivos por su gran costo inicial, pero bien diseñados pueden amortizarse en 15 a 20 años.

6. Especie Vegetal.

El número, espaciamiento y largo de los surcos guarda directa relación con la especie a regar. Así, en cultivos anuales de escaso arraigamiento, los surcos deberán tener un largo menor. Frutales con mayor profundidad radical posibilitan el uso de surcos más largos. Arraigamiento del tipo platiforme implican un mayor número de surcos con tiempos de riegos menores. Las labores mecanizadas también inciden en el espaciamiento.

7. Fertilización, control de plagas y enfermedades.

El agua de riego lleva los fertilizantes al sistema radical, de modo que el programa de fertilización debe sincronizarse con el riego y patrón de raíces. De otra manera, los fertilizantes pueden perderse bajo la zona de raíces o quedar en la superficie sin ser usados, o mantenerse en concentraciones peligrosas dentro de la zona radical.

Los fertilizantes deben aplicarse en el fondo del surco, previo al riego, con la finalidad de que sea el agua el vehículo de transporte. Debe cuidarse, especialmente que el caudal aplicado sea el máximo recomendado, de acuerdo al diseño, de modo de no provocar arrastre de partículas del fertilizante. Debido a la gran velocidad de infiltración inicial de los suelos, y a la existencia de un gradiente de concentración, el movimiento del fertilizante es fundamentalmente perpendicular al flujo del agua en el surco.

El riego por surcos puede tener un rol en el control de enfermedades en tres aspectos. Puede actuar como un vehículo para aplicar pesticidas, tanto como de los fertilizantes. Un humedecimiento parcial de rea del suelo mediante riego por surcos, puede ayudar al control de enfermedades fungosas, evitando los encharcamientos a través de una cuidadosa regulación del caudal del surco, o removiendo el exceso de agua causada por las lluvias infernales, todo lo cual evita la proliferación de algunos tipos de insectos.

II. SISTEMAS DE ADUCCION EN RIEGO SUPERFICIAL

Profesor Eduardo A Holzapfel
Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola

En riego superficial se requiere la utilización de estructuras de aducción que permitan derivar el agua a los surcos o platabandas. Dichas estructuras permiten un adecuado control del caudal, uniformidad en los caudales aplicados al surco o platabanda y una mejor utilización de los recursos humanos.

Entre las estructuras de aducción tenemos : (i) sifones, (ii) tubos rectos, (iii) mangas plásticas, (iv) sistema de baja presión o californiano. Todas estas aducciones requieren de cierta carga hidráulica para derivar una cierta cantidad de aguas siendo el caudal función de dicha carga y del área por donde escurrirá el agua.

A. SIFONES

El sifón es un tubo con una longitud que varía entre 1.0 y 2.0 metros, de forma semicircular que permiten derivar el agua desde los canales a los surcos o platabandas por sobre el borde del canal (Fig. 1). El caudal de dicha estructura se calcula:

$$Q = C * A * \sqrt{2gh}$$

donde Q es el caudal, A el rea del tubo, g la aceleración de gravedad, h la altura efectiva de agua y C coeficiente de descarga que tiene un valor de 0.65.

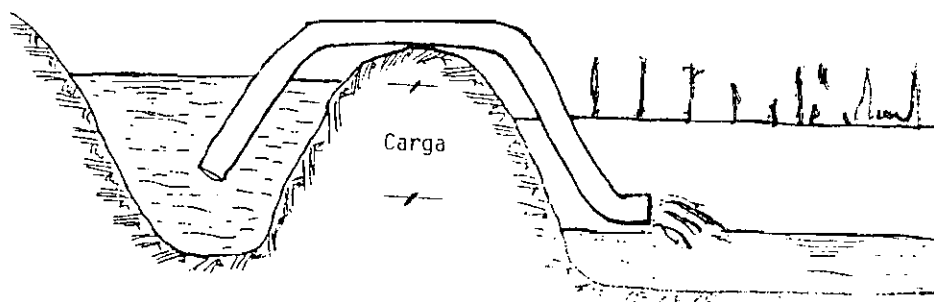
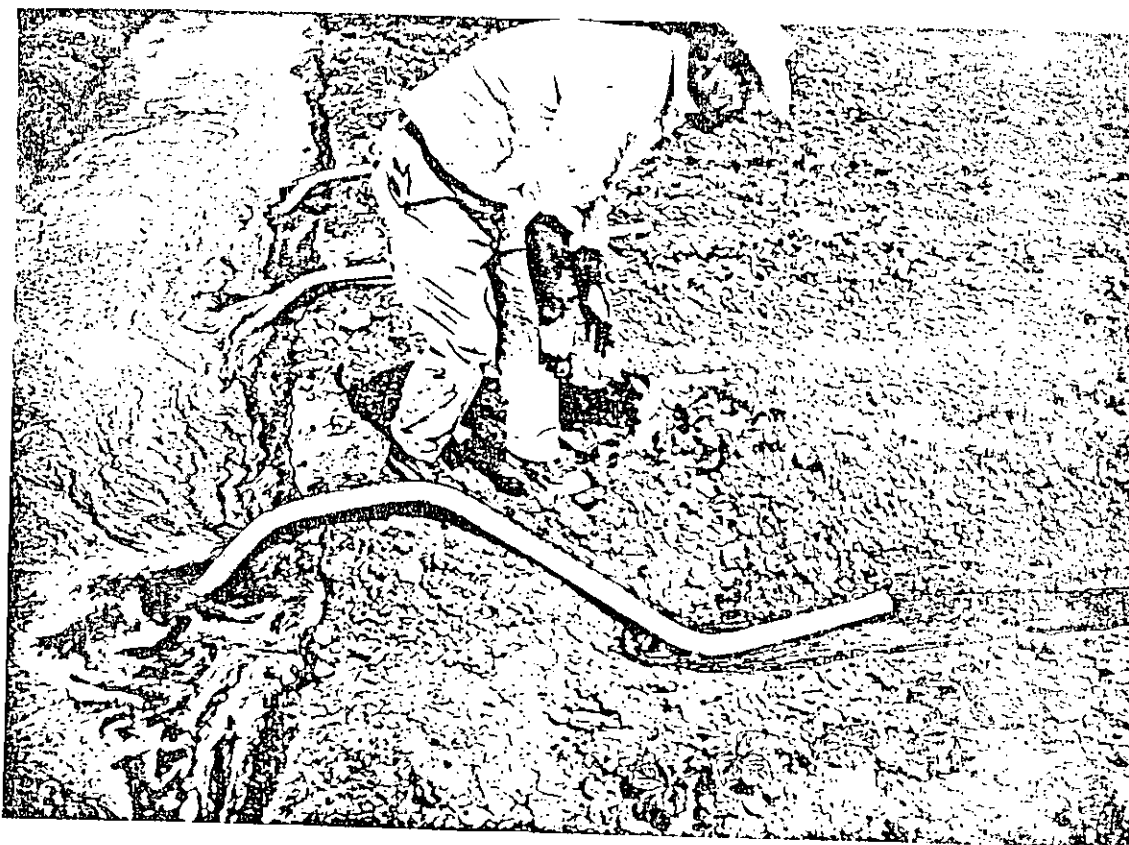


FIGURA 1. Riego por surcos con sifones.

En la figura 2, se entregan curvas de descarga para sifones de diferentes diámetros, en función de la altura efectiva. Dicha altura efectiva se obtiene con retenciones en el canal.

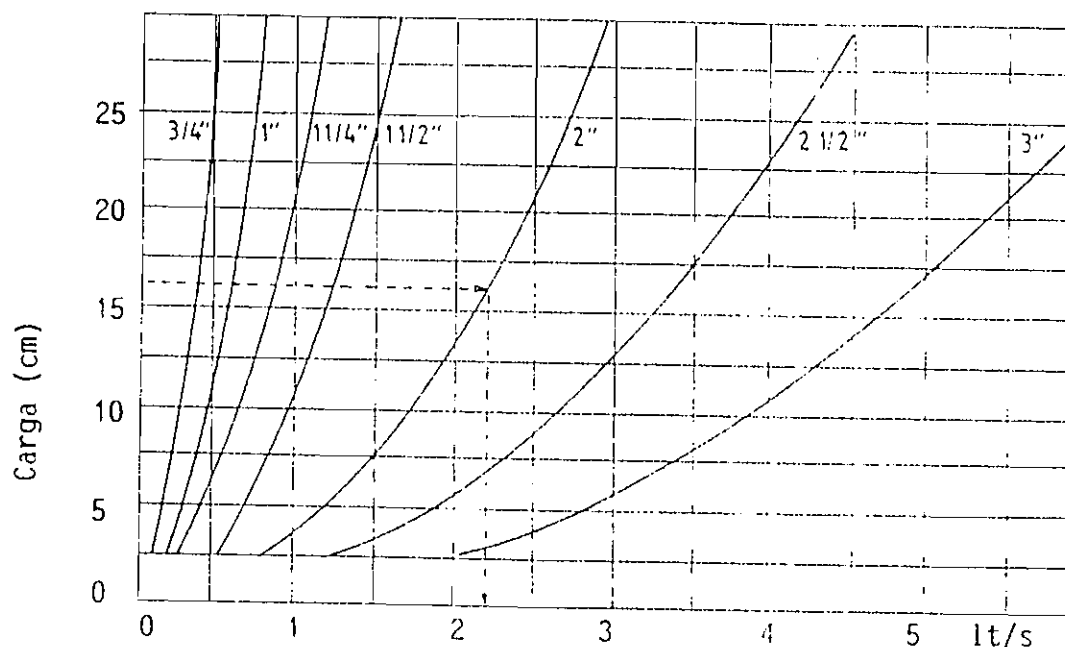
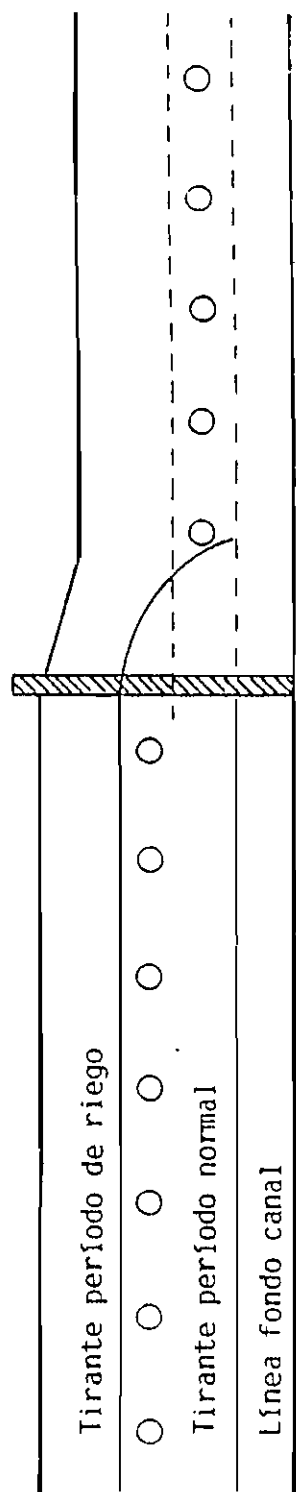


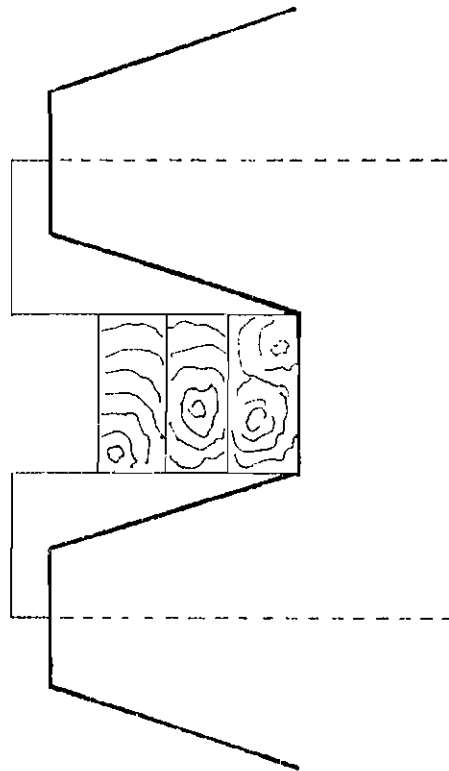
FIGURA 2. Flujo del agua a través de sifones.

B. TUBOS RECTOS

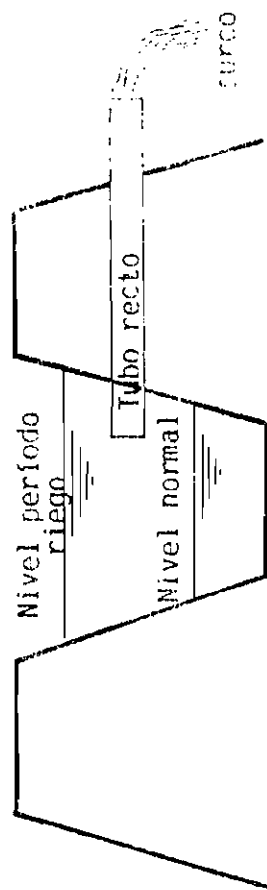
El tubo recto es una estructura que se emplaza en el borde del canal o reguera en forma permanente (Fig. 3). Cada sector de tubos que funcionan en forma simultánea, tienen una retención. El número de tubos que funciona en forma simultánea está relacionado con la disponibilidad de agua, el caudal máximo por surco o ancho de platabanda determinado en el diseño y la pendiente transversal del terreno (pendiente en el sentido del canal). Para su cálculo es necesario determinar la longitud del recurso.



Compuerta de madera



Corte de canal



Nivel período
riego

Nivel normal

FIGURA 3. Riego por tubos rectos.

El caudal que entrega el tubo utilizando la misma ecuación que en sifones, variando el valor del coeficiente C a 0.60. En la figura 4 se entregan curvas de descarga versus altura efectiva, que se obtiene sobre la parte superior del tubo.

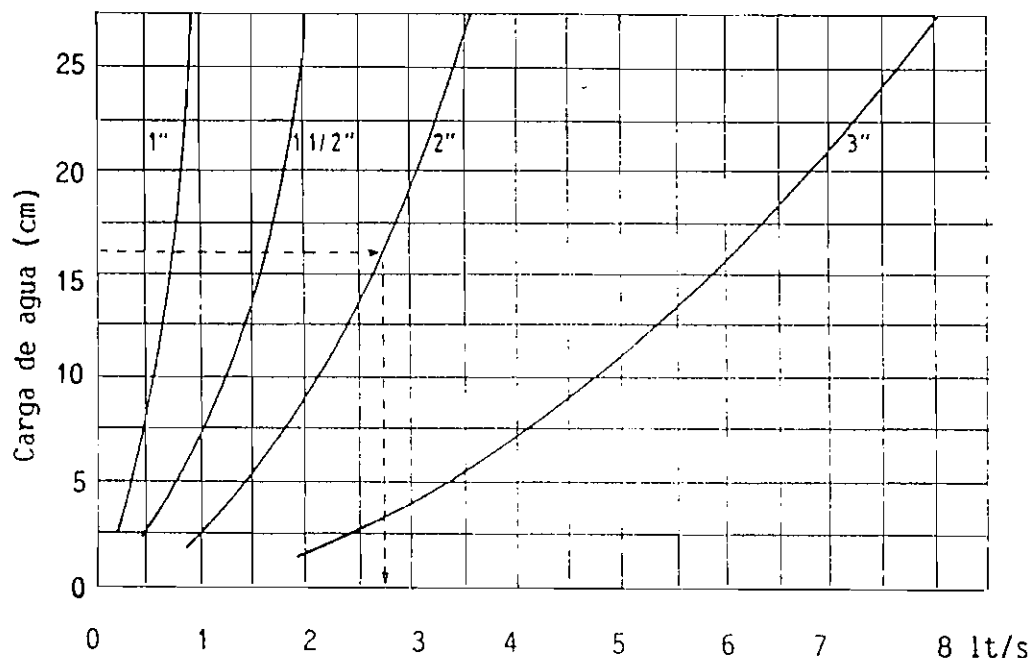


FIGURA 4. Flujo del agua a través de tubos.

La utilización de este tipo de estructura es muy conveniente en canales que además de distribuir el agua al sector a regar, son alimentadores de otras áreas del predio.

Un diseño adecuado del sistema general de riego del predio; canales, dimensionamiento de los métodos de riego y desagües, permiten utilizar este tipo de estructuras, como también un mayor grado de automatización.

La aplicación de caudales reducidos a través de tubos de aducción se obtiene disminuyendo el tirante de elevación en el canal bajando la hoja o listón de madera de la estructura de retención, de manera de reducir la carga hidráulica sobre el tubo.

El uso de este tipo de estructura de aducción requiere, en la cabecera de los huertos o platabandas, de un espacio suficiente para el paso de la maquinaria en sus labores normales. Cuando el canal debe implantarse en el interior del huerto para incorporar los tubos, producto

de una longitud menor a la del cuartel, éstos deben confeccionarse de manera tal que permita un paso expedito y suave de la maquinaria.

C. MANGAS DE POLIETILENO

La manga de polietileno es una estructura a la cual se le confeccionan perforaciones, y se deriva el agua desde un canal principal o alimentador. Esta estructura para que funcione debe tener carga hidráulica en todo su recorrido, lo que obliga a que el canal alimentador esta a una cota superior al sector a regar con la manga. La descarga se calcula con la ecuación:

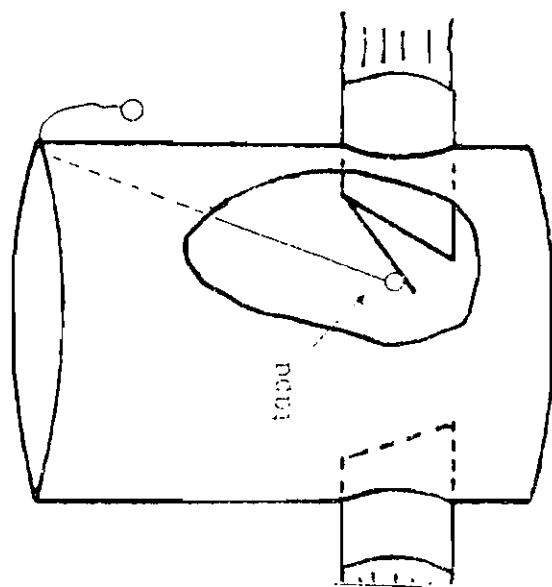
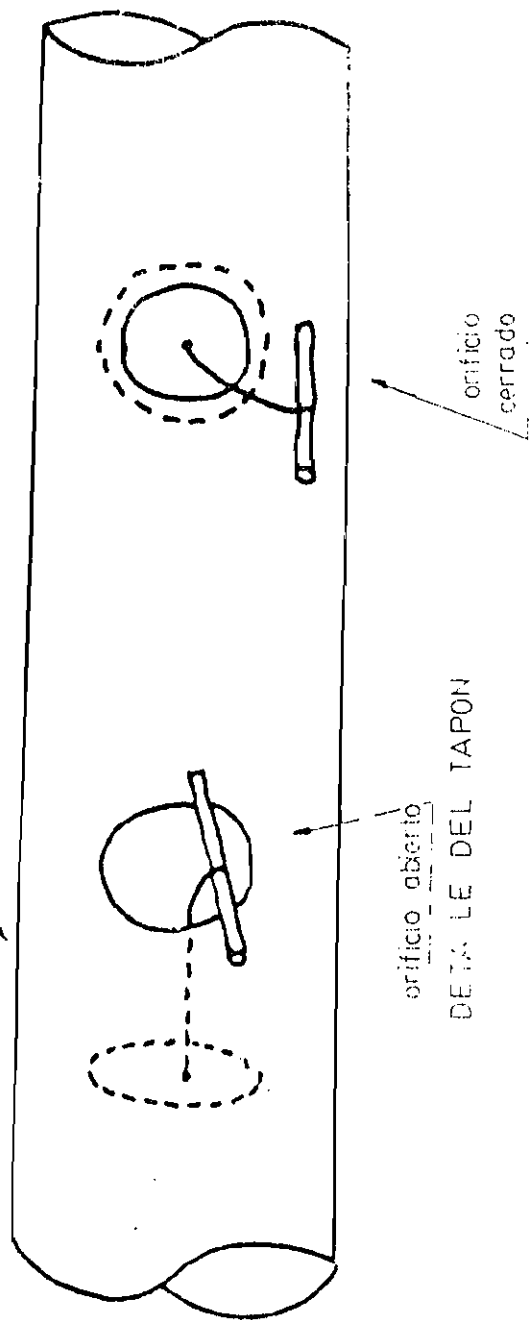
$$Q = 0.78A\sqrt{2gh}$$

donde h es la altura efectiva de agua con el nivel del canal y la estructura de compensación (Fig. 5). A es el área de abertura del orificio en la manga.

La manga de polietileno requiere de ciertos accesorios que permiten regular la presión o carga hidráulica en sectores con mucha variación en el nivel del terreno. El objetivo es lograr que la presión en la manga sea relativamente homogénea o que tenga pequeñas variaciones. Esto permite establecer una buena relación entre diámetro, velocidad de descarga y presión. Una presión excesiva induce a confeccionar un orificio pequeño en diámetro que producirá una gran velocidad de salida para mantener el caudal, lo que erosionará el suelo adyacente.

Las ventajas que presenta este tipo de estructuras es la mejor utilización del terreno y una menor interferencia en las labores culturales, aunque el paso de la maquinaria sobre ella o instalar y sacar continuamente en el período de riego producen un deterioro más rápido de ella y por ende una menor durabilidad.

manga



DETALLE REGULADOR DE PRESION

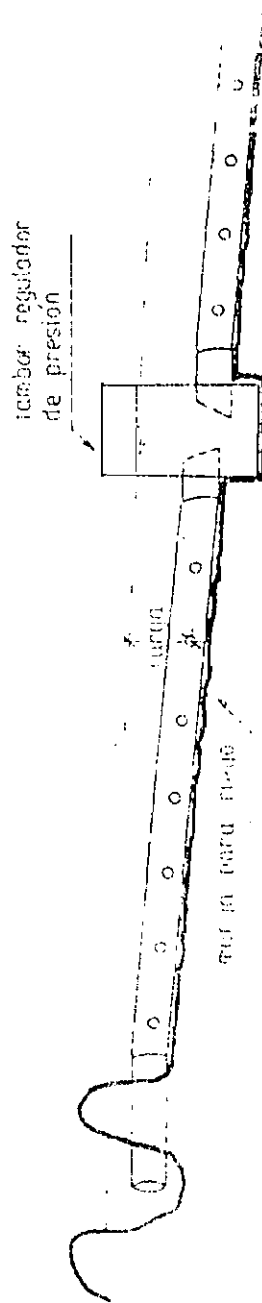


FIGURA 5. Riego por mangas plásticas.

D. SISTEMA DE BAJA PRESION

El sistema de aducción de baja presión o californiano está conformado por un set de tuberías enterradas que se localizan en diversos sectores de la plantación en función del diseño del sistema de riego. Por dichas tuberías se conduce el agua, la que aduce a los surcos o platabandas a través de tubos elevadores que deben tener una altura tal que, permita un caudal homogéneo en cada posición de riego, tomando en cuenta pérdidas de carga en tuberías y topografía del terreno. En la figura 6 y 7 se muestra este sistema esquemáticamente. El sistema está conformado por un set de tuberías enterradas, elevadores, campanas y válvulas, que por lo general son de PVC utilizado prioritariamente por su facilidad de colocación y menor efecto de los elementos químicos.

Las tuberías enterradas son conductoras desde las cuales se accesa el agua al surco o platabanda a través de tuberías elevadoras y la campana (Figura 7). Para lograr un mayor grado de automatización es conveniente que la salida de los elevadores en la campana de un set, tengan una altura basada en la línea de gradiente hidráulica para permitir un flujo homogéneo a través de cada uno de ellos. Cuando el sistema opera con válvula en cada campana, no se requiere un especial cuidado en la altura de los elevadores, sólo el que exista carga hidráulica suficiente para entregar el caudal mínimo adecuado.

Meyer y Aljibury (1977), han encontrado que este tipo de aducción tiene una serie de ventajas entre las que podemos mencionar : (i) reducción de pérdidas en conducción, (ii) permite una mejor utilización del suelo disponible para plantación, (iii) la maquinaria puede transitar por sobre la tubería enterrada no alterando las labores culturales y de cosecha, (iv) elimina problema de malezas en el sector de conducción y (v) permite un adecuado control del caudal de agua a aplicar con un menor uso de mano de obra. Entre las dos ventajas se menciona un costo inicial moderadamente elevado, no adaptables en suelos con un substrato rocoso o con un nivel freático muy superficial. Además, han observado que aguas con sulfato afectan la vida útil de los sistemas con tuberías de concreto, como también producir deterioro por cambios bruscos en la temporada del agua.

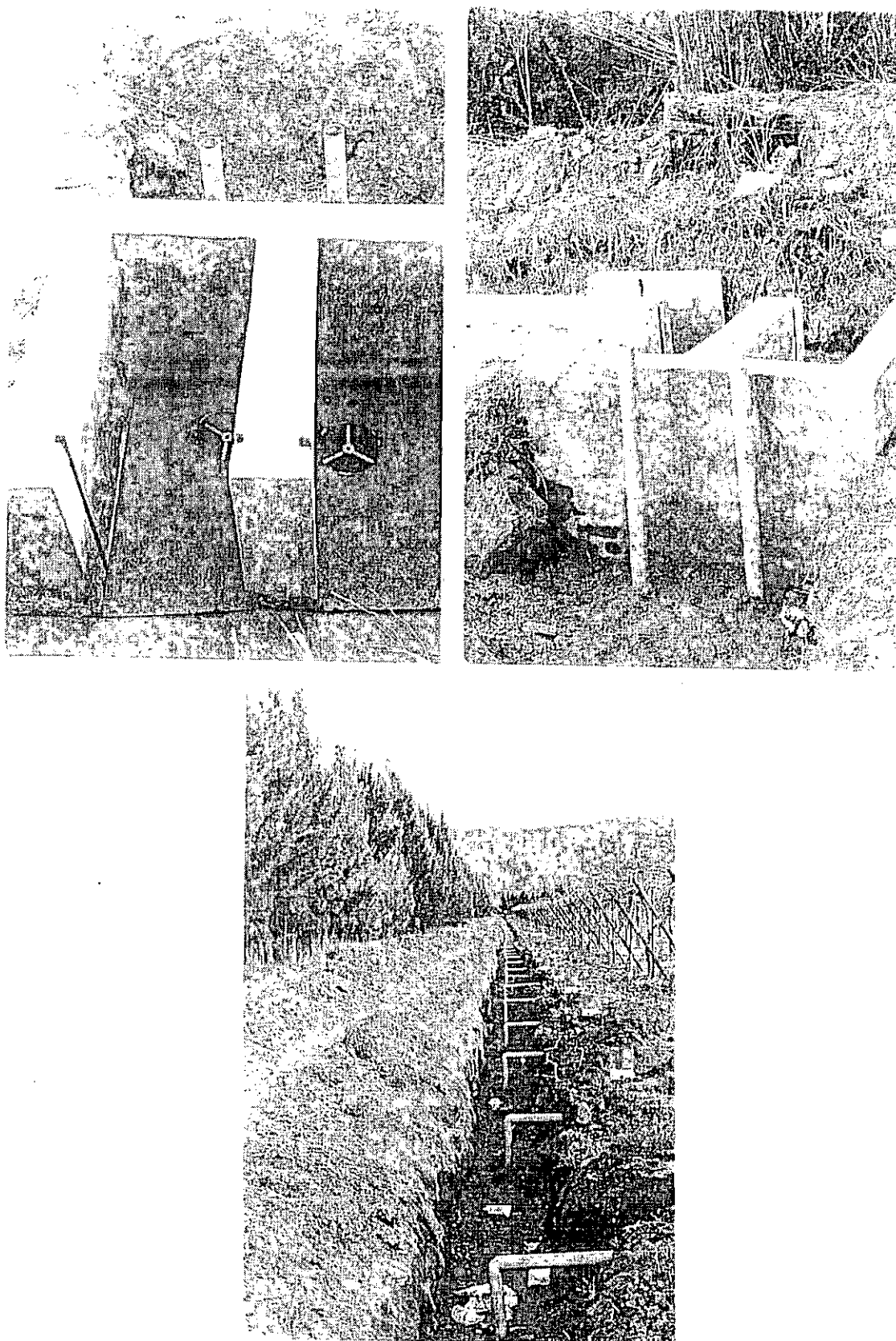


FIGURA 6. Sistema de baja presión de aducción de agua.



FIGURA 9. Sistema de aducción de baja presión.

Es importante mencionar que el costo inicial de todos los sistemas de aducción están en estrecha relación con las características de diseño del riego superficial. Esto indica que al realizar el estudio técnico-económico en el diseño de los métodos de riego es de gran importancia tener en cuenta el sistema de aducción, que afectan los parámetros de diseño.

III. SELECCION DE METODOS DE RIEGO

Profesor Eduardo A Holzapfel
Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola

El éxito o fracaso de una agricultura de riego depende, en gran medida, del método de aplicación de agua utilizado. Una selección errónea impide la obtención de buenos resultados económicos y provoca un retardo en el normal desarrollo de la empresa agrícola.

La selección de un método de riego incide en parámetros como: disponibilidad de agua, tipo de suelo, topografía, clima, cultivo, disponibilidad de mano de obra, energía y el costo relativo de cada recurso. Algunos autores estiman que la eficiencia de riego y los costos de implantación, operación y mantenimiento son las variables que afectan en mayor grado el método de riego a utilizar. Otros, en cambio, basan la selección del método de riego en los parámetros económicos. Holzapfel y otros (1985) establecieron un proceso de selección en que se incluyen los aspectos técnicos y económicos, para elegir el método de riego óptimo (Fig. 1).

Para dicho proceso se incluyen dos etapas: (i) Analítico - técnica y (ii) Técnico - económica. La etapa analítico - técnica toma en consideración, para la selección de los métodos de riego, factores de cultivo. En base a dichos factores, se ordenan los métodos adaptables a las condiciones establecidas. Los índices de "adaptabilidad" se desarrollan de acuerdo a la adaptación del método de riego expresando el nivel de su comportamiento a parámetros tales como densidad de siembra o plantación, susceptibilidad a enfermedades, tipo de crecimiento del cultivo, pendiente del terreno, infiltración del suelo, disponibilidad y calidad del agua y nivel de preparación del personal. Las ecuaciones para el valor de dichos índices que se dan en la Fig. 2, se obtuvieron de un análisis cualitativo.

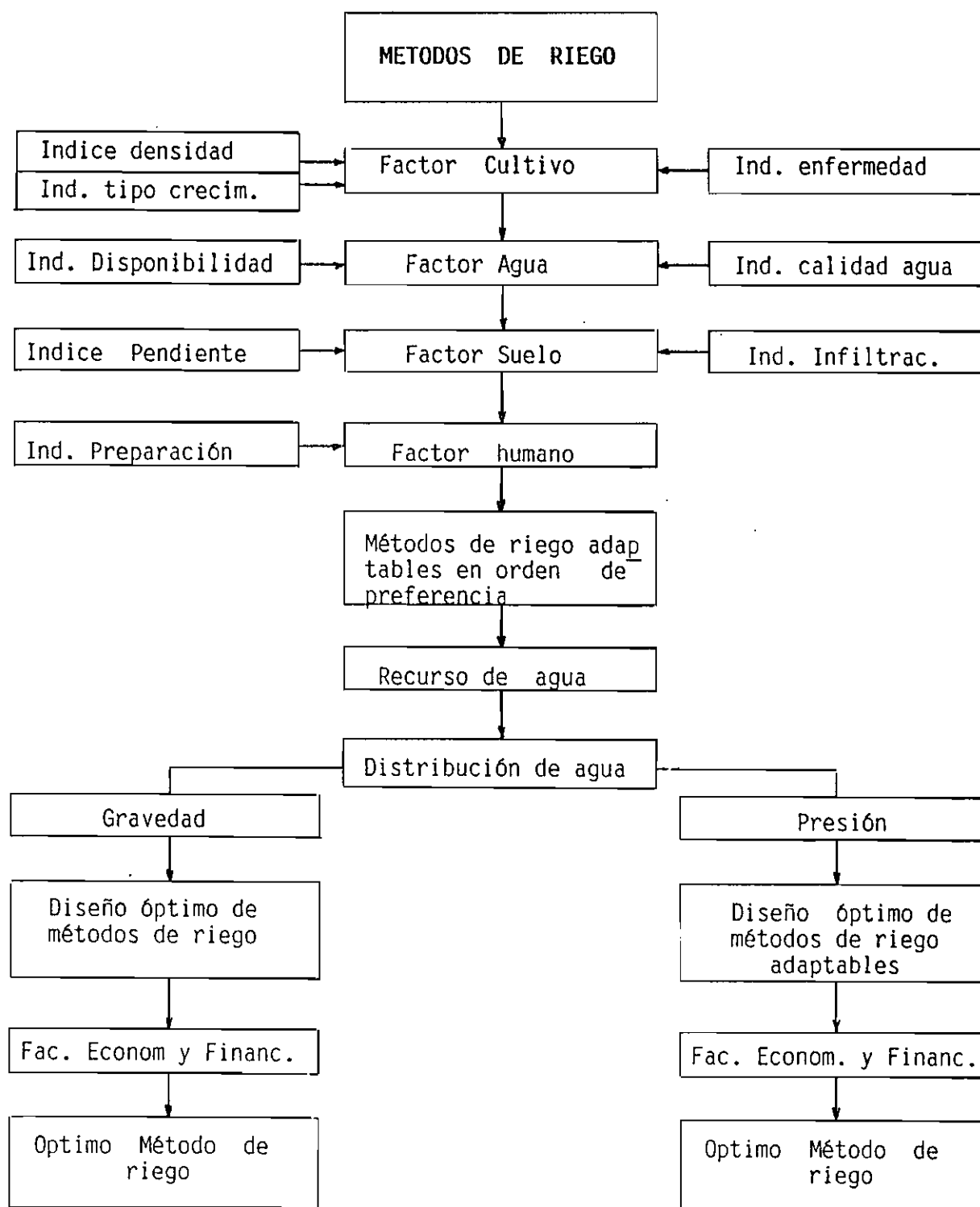


FIGURA 1. Carta de flujo para la selección de un método de riego.

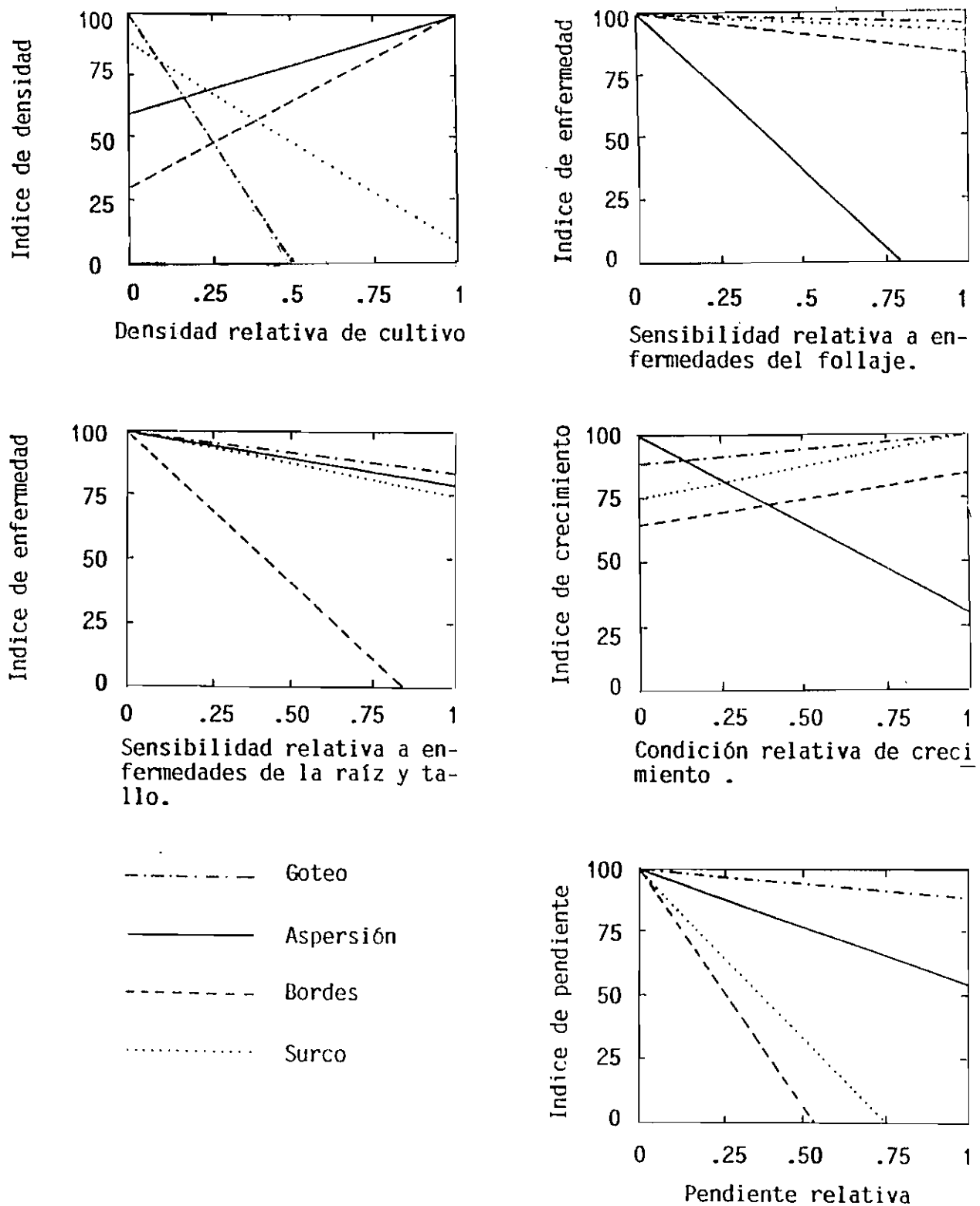
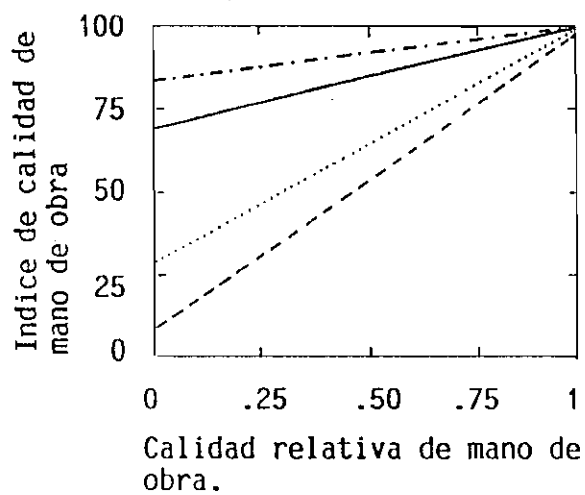
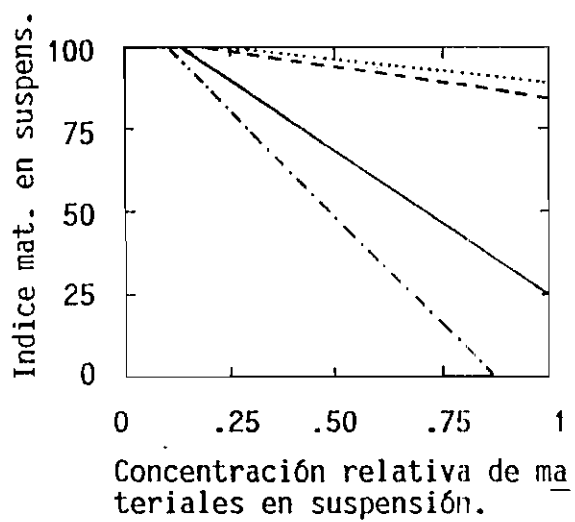
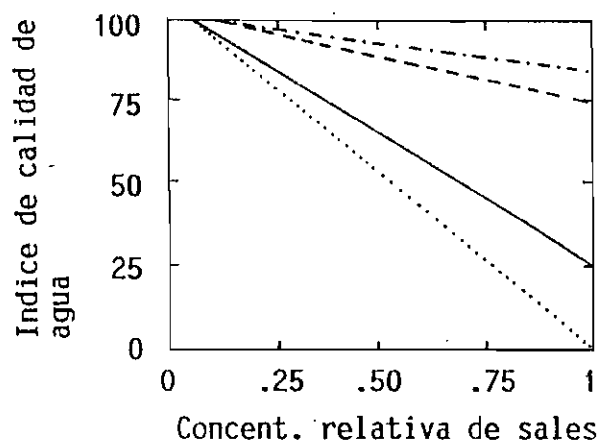
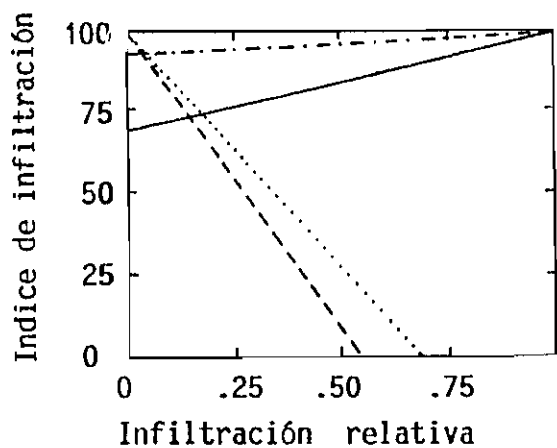


FIGURA 2. Relaciones de índices y métodos de riego.



- Goteo
- Aspersión
- Bordes
- Surcos

FIGURA 2. Continuación.

Para determinar el valor relativo final (VRF) debemos tomar en cuenta todos los factores y multiplicarlos:

$$(VRF)_i = \prod_{j=1}^N \left[\frac{lij}{100} \right]$$

donde i y j corresponden al tipo de índice y el método de riego, respectivamente. Si tomamos como ejemplo un huerto de duraznos en un suelo franco arenoso, con una pendiente media (1.5%), obtenemos un VRF para cada método, como se muestra en el Cuadro 1. De dicho resultado, se observa que desde el punto de vista técnico, goteo es altamente recomendable, aspersión y surco tienen un nivel de preferencia medio y riego por platabandas tiene una baja adaptabilidad.

La etapa técnico - económica analiza desde un punto de vista económico aquellos métodos de riego adaptables técnicamente. Para llevar a efecto el estudio económico y comparar los resultados, es necesario que cada método de riego sea óptimamente diseñado para las condiciones preestablecidas de distribución de agua (Holzapfel et al., 1985). En base a los resultados de ambas etapas, se selecciona el o los métodos de riego más recomendables para la decisión final del empresario.

CUADRO 1. VALOR DE INDICES, METODOS DE RIEGO Y RANKING DE METODOS DE RIEGO (*).

Método de Riego	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Borde	30	97	70	75	18	36	100	100	67	0.006	4
Surco	89	98	96	86	40	50	100	100	75	0.108	3
Aspersión	60	85	97	68	80	81	100	100	90	0.196	2
Goteo	98	99	98	94	95	97	100	100	95	0.782	1

- 1 : Densidad
 2 : Enfermedad hoja
 3 : Enfermedad tallo y raíces
 4 : Crecimiento
 5 : Pendiente
 6 : Infiltración
 7 : Calidad de agua
 8 : Material en suspensión
 9 : Calidad de mano de obra
 10: Valor relativo del Mét. Riego
 11: Ranking

(*) Holzapfel E. y otros (1985).

INFILTRACION PARA METODOS DE RIEGO SUPERFICIALES

Profesor Eduardo A Holzapfel
Ricardo Matta
Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola

1. INTRODUCCION

El propósito principal del riego es el de restituir agua a la zona de raíces mediante diversos métodos de riego mediante los que se aplica el agua a la superficie del terreno para que penetre en él y quede disponible para las plantas. En estas condiciones, la velocidad con que el agua penetra en el suelo, denominada velocidad de infiltración, reviste gran importancia, particularmente por la variación de las características de suelo tanto temporales como espaciales, durante el proceso dinámico que se produce por la interacción de la fase líquida del agua con la sólida de las partículas de suelo.

La velocidad de infiltración es un parámetro que debe ser estudiado y determinado con detención, pues tiene un rol primordial en el manejo del agua a nivel predial.

En muchos trabajos se han investigado métodos para determinar la velocidad de infiltración de un suelo (HOLZAPFEL et al. 1986). Cada uno de estos, se ha desarrollado para satisfacer necesidades específicas de humedad de los suelos.

Los principales métodos de medición de velocidad de infiltración, bajo condiciones de campo, comprenden: inundación y estancamiento de agua en la superficie, aplicación de agua por aspersión, medida de entrada y salida de agua en surco o platabandas y el avance del frente de agua.

La utilización de un método se debe basar en los objetivos que persigue. DIAZ (1974) determinó que no son comparables los métodos que utilizan agua que escurre con aquellos en que el agua permanece apoyada; de esto podemos deducir que para riego por surcos o platabandas es recomendable utilizar métodos en que el agua escurre y para aspersión se pueden utilizar métodos en que el agua permanezca apoyada.

En todos ellos es necesario realizar varias mediciones en las condiciones de humedad del suelo antes del riego, con el fin de obtener valores adecuados y confiables.

El objetivo de esta publicación es proporcionar antecedentes sobre la infiltración de agua en el suelo y algunas metodologías para estimarla.

2. ASPECTOS DE LA INFILTRACION

2.1. Función de Infiltración

La velocidad de infiltración o intensidad de entrada, se puede definir como la velocidad de penetración del agua en el perfil del suelo, cuando la superficie del terreno está cubierta por una capa de agua poco profunda.

La infiltración tiene dimensión de velocidad ($L T^{-1}$), como la lámina de agua (L) admitida por el suelo en una unidad de tiempo (T) o como la cantidad de agua absorbida por la unidad de superficie del terreno en la unidad de tiempo ($L^3 T^{-1} L^{-2}$), respectivamente. Si las mismas unidades se usan en ambos casos, las expresiones son dimensionalmente equivalentes ($L T^{-1}$). En la primera forma la expresión común de velocidad de entrada es $cm h^{-1}$ o $cm min^{-1}$. En la segunda forma, generalmente se expresa como $m^3 min^{-1} m^{-2}$. Es común, por varios autores, señalar que la infiltración obedece a un fenómeno de movimiento vertical del agua en el perfil de suelo; se ha eliminado aquella que es tanto o más importante, cual es el movimiento horizontal que define el espaciamiento de los surcos desde la línea de plantación.

Cuando se administra agua a un área de terreno, con el fin de restituir el contenido de agua en el suelo, puede ocurrir que la cantidad de agua absorbida aumente con el tiempo menos que proporcionalmente. Al representar gráficamente la lámina acumulada del agua infiltrada I_{acum} contra el tiempo t , resulta un tipo de curva como la que se muestra en la **Figura 1**. Por otra parte, si la velocidad de infiltración V_i , se representa gráficamente contra el tiempo t , la curva tendrá la forma de la **Figura 1**. Ambas curvas muestran una disminución en el tiempo, a medida que transcurre la infiltración. A la disminución de la velocidad de infiltración después de cierto período de infiltración se denomina infiltración básica.

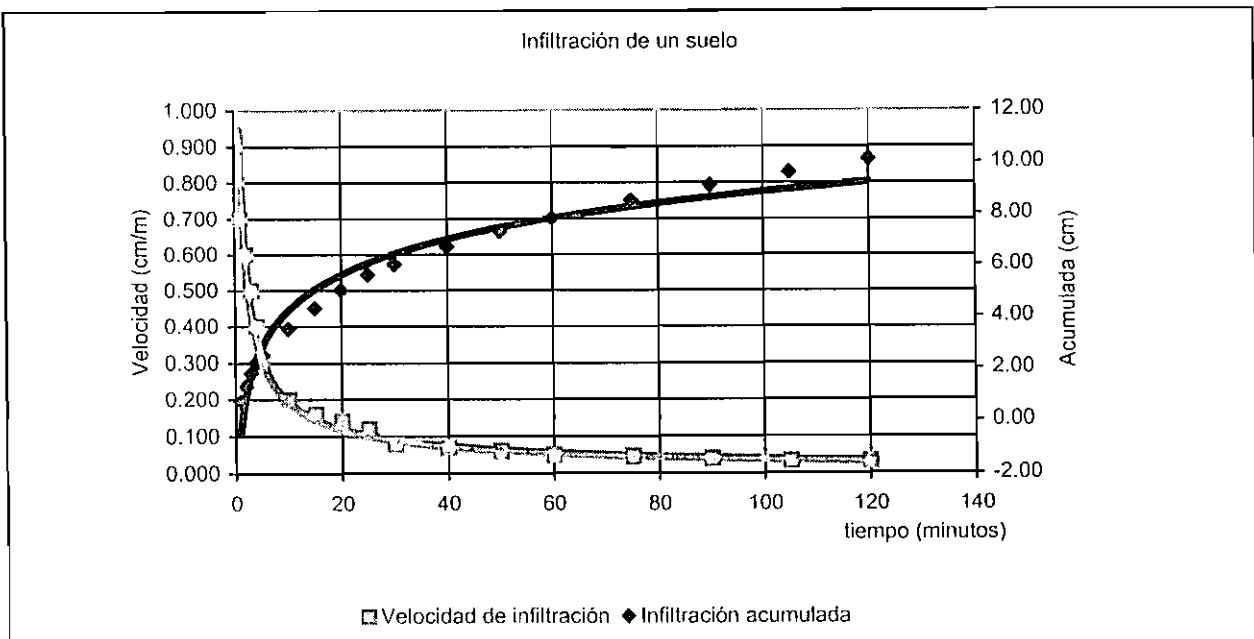


Figura 1. Gráfico que muestra la infiltración de un suelo.

Al analizar las relaciones de humedad en el suelo BODMAN y COLEMAN (1944) distinguieron durante el proceso de infiltración, cuatro zonas en la masa de suelo debajo de la superficie del terreno:

(i) una zona próxima a saturación de una profundidad de 1.0 a 1.5 cm; (ii) una zona donde el contenido de agua decrece rápidamente con la profundidad; (iii) una zona llamada la zona de transmisión, donde el contenido de agua es casi constante y aproximadamente los tres cuartos de saturación; (iv) una zona con una gran y violenta disminución del contenido de agua, llamada zona de humedecimiento, la cual termina abruptamente en el frente de humedad.

2.2. Teoría

La teoría de infiltración está basada en un análisis del movimiento del agua en el suelo bajo condiciones de no saturación. Durante la infiltración, la fase líquida y la fase gaseosa coexisten en la masa de suelo, con excepción de la zona de contacto entre el suelo y el agua en la superficie del terreno.

La discusión que se presenta a continuación está principalmente relacionada al movimiento descendente del agua, aunque se admite que con algunas adaptaciones, puede ser aplicado a la infiltración horizontal o a la infiltración en cualquier ángulo que va desde lo horizontal a lo vertical.

La teoría capilar y la analogía con el flujo calórico o eléctrico, fueron fundamentales en los primeros intentos de explicar el movimiento del agua en el suelo y la velocidad de infiltración.

Muchos científicos, sobre las bases de la teoría capilar, en trabajos analizados por GARDNER (1967), propusieron ecuaciones semi-empíricas que describen el fenómeno. PHILIP (1957) en una serie de trabajos dió bases más sólidas a la teoría de la infiltración, resolviendo la ecuación del flujo para el movimiento vertical hacia abajo sujeta al efecto de la gravitacional:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} * [D(\theta) * \frac{\partial \theta}{\partial z}] - [\frac{\partial k(\theta)}{\partial z}] \quad (1)$$

En las siguientes condiciones:

$$\theta = \theta_0 \quad t = 0 \quad z > 0$$

$$\theta = \theta_s \quad t = 0 \quad z = 0$$

donde:

θ es el contenido de agua en el suelo expresado como fracción de volúmenes ($L^3 L^{-3}$)

θ_0 es el contenido inicial de agua en el suelo expresado como fracción de volúmenes ($L^3 L^{-3}$)

θ_s es el contenido de agua en el suelo superficial expresado como fracción de volúmenes ($L^3 L^{-3}$)

$D(0)$ es el coeficiente de difusividad expresado en función de ($L^2 T^{-1}$)

t es el tiempo (T)

$k(0)$ es la conductividad hidráulica expresada en función de ($L T^{-1}$)

z es la coordenada espacial positiva vertical hacia abajo (L).

La solución dada por Philip a esta ecuación está basada en series de potencia infinita para la infiltración acumulada. Con fines prácticos se consideran suficientes los dos primeros términos para el movimiento descendente:

$$I_{\text{acum}} = S t^{1/2} + C t \quad (2)$$

Los coeficientes de ambos términos son funciones de la difusividad del agua en el suelo y el contenido inicial y superficial de agua en el suelo. El coeficiente S tiene un significado especial en el comienzo del período de infiltración, representa la capacidad inicial del suelo para almacenar y liberar agua. El coeficiente C está relacionado con la capacidad del suelo para transmitir agua, y es importante en períodos posteriores del proceso de infiltración. De acuerdo con las recomendaciones de Philip, los valores de S y C pueden ser aproximados por las determinaciones actuales de I_{acum} a $t = 1000$ seg y $t = 10000$ seg, respectivamente.

Por diferenciación de la Ec. 2 con respecto al tiempo puede obtenerse la ecuación de velocidad de infiltración:

$$dI_{\text{acum}} / dt = VI$$

Entonces:

$$VI = S/2 t^{-1/2} + C \quad (3)$$

2.3. Ecuaciones empíricas

Se han propuesto varias ecuaciones empíricas para expresar la velocidad de infiltración como una función del tiempo; dicha relación puede ser representada por una curva de forma hiperbólica o por una función matemática. Si I_{acum} es el volumen de agua infiltrado por una unidad de área y t es el tiempo en que el agua ha estado en contacto con el suelo, entonces I_{acum} puede ser representada por alguna de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} I_{\text{acum}} &= K * t^b && \text{(Kostiakov)} \\ I_{\text{acum}} &= K * t^b + Ct && \text{(Kostiakov- Lewis)} \\ I_{\text{acum}} &= K * t^{0.5} + Ct && \text{(Philip)} \end{aligned}$$

Donde K , a , b y c son constantes

La ecuación de KOSTIAKOV (1932) expresa la velocidad de infiltración en un punto:

$$VI = a * t^b \quad \text{o bien} \quad dh/dt = K * t^b \quad (4)$$

donde:

VI es la velocidad de infiltración ($L T^{-1}$) en $cm \min^{-1}$ o $cm h^{-1}$
 dh/dt es la variación de la altura de agua con el tiempo en un cilindro infiltrómetro.
 t es el tiempo de infiltración (t) en min o en hora
 a es un coeficiente el cual representa la velocidad de infiltración a $t = 1$; expresado en $cm \min^{-1+b}$ o $cm h^{-1+b}$
 b es un exponente sin dimensión. Siempre es negativo con valores que van de 0 y -0.1

Integrando la Ec. 4 entre los límites $t = 0$ y $t = t$, se obtiene la infiltración acumulada:

$$\begin{aligned} I_{acum} &= \int_0^t VI \, dt \\ I_{acum} &= \int_0^t a t^b \, dt \\ I_{acum} &= a/b+1 t^{b+1} \end{aligned} \quad (5)$$

La Ec. 5 también puede ser representada así:

$$I_{acum} = A t^B \quad (6)$$

donde:

$$A = a/(b + 1) \quad \text{y} \quad B = b + 1$$

O bien:

$$dh/dt = K * t^b \rightarrow dh = K * t^b * dt$$

al integrar entre los límites $t = 0$, $h = 0$, $t = T$ y $h = H$ se obtiene H que es la altura total infiltrada en el tiempo.

$$\begin{aligned} \int_0^H dH &= \int_0^T K t^b \, dT \\ H &= (K * T^{b+1}) / b+1 + c \end{aligned} \quad (7)$$

Donde c = es la velocidad de infiltración constante para $t = \infty$

Generalmente, las ecuaciones 4 y 5 se ajustan muy bien a la mayoría de las condiciones de las prácticas del riego por superficie. Sin embargo hay algunos casos en los cuales la velocidad de entrada alcanza un valor constante dentro del periodo de infiltración; si es así, la Ec. 4 se convierte en:

$$VI = a t^b + c \quad (8)$$

Donde c es la velocidad de infiltración constante para $t = \infty$

La infiltración acumulada I_{acum} será por lo tanto:

$$I_{acum} = a/b+1 t^{b+1} + c \quad (9)$$

La Ec. 9 también puede ser representada así:

$$I_{acum} = A t^B + c \quad (10)$$

Con $b = -0.5$, la Ec. 10 es equivalente a la ecuación de Philip (2).

Se han desarrollado otras ecuaciones empíricas tales como las de Gardner y Widtsoe presentadas por CHRISTIANSEN et al. (1966) y la ecuación de HORTON (1933), extensamente usada en hidrología.

La ecuación de Kostiaikov ha sido muy usada en las ciencias del suelo y del riego, principalmente por resultar práctica; ambos parámetros pueden obtenerse por simple representación gráfica de los datos experimentales en papel doble logarítmico. En la actualidad, distintas ecuaciones usadas para proyectar los métodos de riego por superficie involucran los parámetros de la ecuación de Kostiaikov, especialmente el exponente b o B .

La velocidad de infiltración promedio es la relación de la infiltración acumulada y el tiempo de entrada.

$$VI_{prom} = I_{acum} / t \quad (L T^{-1}) \quad (11)$$

Sustituyendo la Ec. 2.5 en la Ec. 2.9 se obtiene la ecuación promedio en un punto:

$$VI_{prom} = a / b+1 * t^b \quad (12)$$

Entonces VI_{prom} es la velocidad promedio de entrada de agua en el suelo en un periodo t .

La infiltración básica VI_b es otra cantidad que merece consideración debido a su importancia al proyectar el riego por superficie. La velocidad de entrada básica es el valor instantáneo cuando la velocidad de cambio de entrada para un periodo standard, es 10% o menos de su valor.

El tiempo en el cual $VI = VI_b$ se encuentra igualando la primera derivada de la Ec. 4 por 0.01:

$$dVI/dt = -0.01 VI$$

entonces:

$$a b t^{b-1} = 0.01 a t^b$$

$$t^b = -10 b \quad (13)$$

Si la Ec. 13 se substituye en la Ec.4, se obtiene VI_b :

$$VI_b = a (-10 b)^b \quad (14)$$

Las ecuaciones 13 y 14 son generalmente válidas si se emplean unidades consistentes, cm h⁻¹ o cm min⁻¹.

2.4 Factores que afectan la infiltración.

Según el análisis teórico de Philips la velocidad de infiltración de un suelo homogéneo e isotérmico depende de la capacidad del suelo para almacenar y transmitir agua.

En la ecuación de Philips ambos parámetros son funciones de muchos factores. Estos factores son el resultado de una diversidad de valores cuantitativos comúnmente obtenidos en el campo. Desafortunadamente, en razón de que algunos de estos factores son extremadamente dinámicos, cambian con el manejo del agua y del suelo. Por lo tanto aún no ha sido posible llegar a una cifra para la capacidad de infiltración, perteneciente a una específica unidad taxonómica de clasificación de suelo, excepto cuando se requiere una estimación aproximada de la velocidad de infiltración básica, o cuando se usa una expresión cualitativa, como alta, moderada o baja.

La infiltración puede ser evaluada por la ecuación del flujo, la cual es válida para condiciones de saturación y de no saturación. Los factores que afectan la infiltración pueden agruparse como sigue: factores que afectan el gradiente hidráulico y factores que afectan la conductividad hidráulica y el coeficiente de difusión. Para una discusión más amplia de los factores involucrados, estos se agrupan de acuerdo a las características inherentes del suelo y relacionados con las prácticas de manejo del agua y el suelo como sigue: (1) características físicas del suelo; (2) características del perfil del suelo; (3) características de humedad del suelo; (4) método de riego y manejo del agua; (5) otros factores.

2.4.1. Características físicas del suelo

La macro-porosidad del suelo es el primer factor que afecta la conductividad hidráulica en el estado de casi saturación y por lo tanto también la velocidad de infiltración. La porosidad depende de la textura y de la estructura. El agua pasa más rápidamente a través del perfil del suelos en un suelo grueso con mayor porosidad no capilar, que en un suelo pesado en el cual predominan los poros capilares.

La influencia de la estructura y de la estabilidad estructural, es también importante. Los suelos estables-al humedecimiento y desecación y sujetos a una regular secuencia de cultivo y buen manejo tienen mayor oportunidad de mantener una superficie abierta permeable al agua.

El contenido de arcilla, la composición mineralógica de la arcilla y la composición del complejo de intercambio, son otros factores que deben considerarse, esto es, suelos con alto contenido de arcilla montmorillonítica o illítica, se contraen y se hinchan alternadamente con el humedecimiento y desecación.

Los agentes cementantes del suelo, tales como materia orgánica y óxidos inorgánicos, influyen en la formación de agregados y por lo tanto mantienen una alta conductividad. La velocidad de entrada puede ser reducida por el debilitamiento de la estructura de una capa muy delgada de la superficie del suelo. Particularmente cuando para el riego se usa agua clara, la separación de agregados y el desleimiento, produce un sello superficial que reduce la penetración del agua. El impacto de las gotas provenientes del riego por aspersión, pueden producir los mismos resultados. De otra manera, el depósito de sedimento erodado en alguna sección aguas arriba y el asentamiento de sedimentos acarreados por el agua de otra parte en el terreno regado por superficie, puede ser la causa del sellado superficial.

2.4.2. Características del perfil

En suelos estratificados no homogéneos, como los que se encuentran en muchas regiones áridas, la velocidad de entrada del agua depende de las condiciones físicas inherentes, siendo aproximadamente constante con la profundidad del suelo. Pero con frecuencia, especialmente en climas húmedos, el perfil del suelo muestra estratificación, y la capacidad de infiltración puede variar considerablemente para horizontes de suelos individualmente diferenciados.

En caso de que un horizonte edáfico cerca de la superficie presente la menor capacidad de infiltración, el proceso total esta entonces gobernado por la infiltración a través de esta capa. Sin embargo si el estrato limitante yace más profundamente en el perfil del suelo, la velocidad de entrada puede ser inicialmente alta dependiendo de la capacidad de infiltración de los estratos superiores. Cuando el frente de humedad alcanza un estrato menos permeable, la infiltración adicional de agua será gobernada por infiltración de las capas menos permeables.

Sobre una capa limitante puede desarrollarse una capa de agua colgante, debido a que el agua no puede escapar lateralmente en el movimiento unidimensional descendente. Esto podría ocurrir no solo sobre los estratos con un muy bajo valor absoluto de permeabilidad, sino también como una consecuencia de la permeabilidad relativa, cuando ésta es mucho más alta en el estrato superior que en el inferior.

Las características del perfil del suelo juegan un papel importante en la determinación del ancho y del espaciamiento de los surcos. Según lo que HENDERSON y HAISE (1967) señalan, si se ubican en un estrato poco permeable a determinada profundidad en el perfil, la velocidad inicial de infiltración dependerá del área mojada, pero una vez que comienza a desarrollarse la napa

freática sobre el estrato limitante, el espaciamiento entre surcos deja de tener importancia.

2.4.3. Características de humedad del suelo

Las características de humedad del suelo o relación de retención de agua, es un factor importante en la infiltración. Este factor ha sido analizado teóricamente y probado bajo condiciones

de laboratorio y de campo. La relación de retención de agua es ahora considerada como una característica física para cada tipo de suelo. Por lo tanto, el contenido de agua necesita ser incluido como uno de los parámetros en una prueba de infiltración.

Una buena aproximación, es indudablemente realizar la prueba de infiltración cuando el suelo se encuentre aproximadamente en el contenido de humedad al cual se aplicará normalmente el riego; como por ejemplo uno que represente el 50% del total de humedad disponible. Esta regla es válida en especial para suelos pesados que se contraen y se agrietan al secarse, debido a la relación que existe en los suelos arcillosos que se expanden al humedecerse y contraen al secarse.

2.4.4. Método de riego y manejo del agua

El método de riego afecta el acceso de agua en el suelo, el espesor que representa el flujo o el agua estancada sobre la superficie del terreno y la uniformidad de aplicación. En riego por aspersión, el agua penetra en el suelo inmediatamente al llegar a la superficie del terreno. En riego por superficie, el agua escurre sobre el terreno en espesores diversos a través de canales de diferente tamaño y forma, lo que produce diferentes gradientes hidráulicos y además diferente área efectiva para la infiltración.

Una diferencia importante entre los patrones del flujo de agua entre bordes (platabandas) y surcos, es la que existe en relación al área mojada. En riego por bordes (platabandas) prácticamente se cubre toda el área con una delgada lámina de agua, mientras que el riego por surcos se cubre parcialmente. Debido a que el área mojada es menor en riego por surcos, la cantidad total involucrada en infiltración es también más pequeña que en riego por bordes (platabandas).

Las condiciones hidráulicas del surco, las cuales dependen del caudal, tamaño, pendiente, forma y rugosidad de la superficie, tienen un efecto sobre el perímetro mojado y sobre el área de entrada de agua. Por lo cual, la velocidad de infiltración dependerá de las condiciones hidráulicas del surco (Zuñiga C. 1998). Una posible unión de los surcos adyacentes, debido al movimiento lateral del frente húmedo, puede en consecuencia afectar también la velocidad de infiltración.

2.4.5. Otros factores

La temperatura influye en la velocidad de infiltración ya que la temperatura afecta la viscosidad y también la tensión superficial. El efecto de la temperatura en la infiltración no ha sido comprobado hasta ahora, de acuerdo al conocimiento de los autores, pero se supone que es prácticamente reducido. Lo que influye definitivamente es la calidad del agua que debe ser igual a la que se utilizará en los riegos, del mismo contenido de sales y turbidez

Otro factor importante que debe tenerse en cuenta es el aire atrapado durante la inundación. El aire permanece en el espacio vacío del suelo y no puede escapar bajo inundación extensiva. En riego por surco, en el cual la superficie del terreno está parcialmente cubierta con agua, el aire atrapado es menos importante, en la mayor parte de los suelos.

3. MÉTODOS PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

3.1 CILINDRO INFILTRÓMETRO DOBLE

El método más ampliamente usado para determinar la infiltración de un suelo es el del cilindro infiltrómetro, el cual es adecuado para métodos de riego que permiten mojar directamente una gran superficie de suelo (bordes, regueros en contorno, aspersión).

El flujo radial es minimizado por medio de un área tampón alrededor del cilindro central. El movimiento del agua es en dirección vertical hasta que pasa a la parte inferior de la orilla del cilindro, desde donde puede producirse un flujo bidimensional, gobernado por el potencial matricial del suelo.

La limitación más seria para el uso de cilindros infiltrómetros es que su emplazamiento en el suelo provoca un cierto grado de alteración de sus condiciones naturales (destrucción de la estructura o compactación produciendo cierta variación en la cantidad de agua que penetra en el suelo. Además, la interfase entre el suelo y el lado del cilindro metálico puede causar una entrada anormal de agua, resultando un mayor volumen de agua que se infiltra en un tiempo dado.

Otra de las limitaciones que presenta el uso de cilindros es el problema del aire atrapado al interior de la columna de suelo. La incapacidad del aire para escapar desde el suelo bajo condiciones de flujo saturado, generalmente crea un cojín interno de aire que resulta en un impedimento para el movimiento vertical del agua, resultando velocidades de infiltración menores.

Es importante hacer notar que no es conveniente medir la velocidad de infiltración en suelos alterados, como sería un terreno arado por ejemplo.

Materiales

En general los materiales usados en la determinación de la infiltración con este método son: cilindro infiltrómetro, disco metálico, combo, regla graduada en cm y mm, cronómetro, pala, balde, trozo de plástico y hoja de registro.

Procedimiento

Tomar una muestra de suelo para determinar el contenido de humedad del suelo en el que se realizará la prueba de infiltración.

Para proceder a instalar el cilindro previamente se limpia con una pala la vegetación de la superficie, en el lugar donde se instalará, teniendo la precaución de no alterar la estructura del suelo. A continuación, con golpes

suaves sobre el trozo de madera, puesto sobre el cilindro, se introduce el cilindro hasta una profundidad aproximada de 10 a 15 cm (Figura 2).

Cuando no se cuenta con cilindros infiltrómetros dobles, y con el propósito de evitar el flujo radial del agua, se puede construir en torno al cilindro una poceta y mantenerla permanentemente con agua desde el comienzo hasta el final de la medición.

Una vez instalado el equipo se ubica un trozo plástico en el interior del cilindro y con la ayuda de un balde se vacia un volumen cualquiera de agua. El plástico impide que el agua golpee directamente la superficie del suelo, produciendo alteraciones y variando los valores de velocidad de infiltración.

Simultáneamente, se vacía agua en la poceta o en el cilindro exterior que actúan como área tampón.

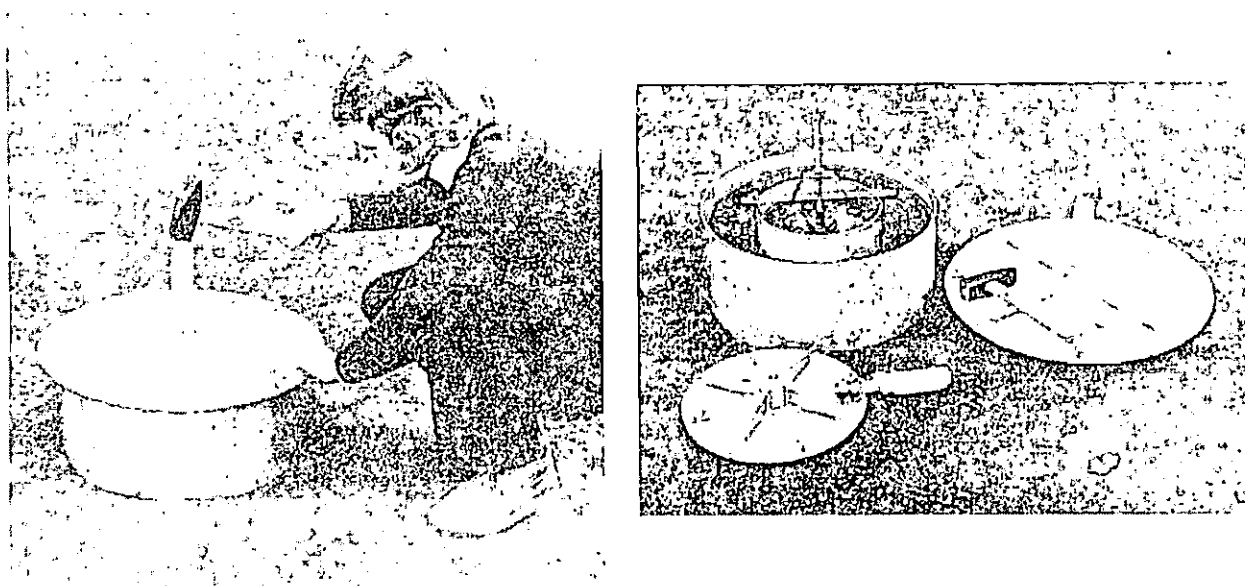


Figura 2. Instalación y medición de cilindros infiltrómetros.

Lectura de datos

Una vez retirado el plástico del interior del cilindro, se procede a tomar la primera lectura. Para tal objeto, se ubica una regla sobre una estaquilla previamente instalada, o bien se toma como referencia el borde superior del cilindro y en los intervalos de tiempo que se indican, se procederá a anotar las lecturas de agua observadas en la regla.

Desde el punto de vista de riego, la velocidad de infiltración tiende a hacerse constante alrededor de las 2 horas de iniciada la medición (velocidad de infiltración básica), por esta razón se recomienda realizar las lecturas en los tiempos que se muestran en la tabla 1.

Relleno del cilindro

Cuando la infiltración es muy alta y se supone que se consumirá toda el agua del cilindro antes de terminar el período de mediciones, éste podrá rellenarse hasta la altura deseada. En la hoja de registro deberá quedar estampado el tiempo en que se hizo el relleno y la altura de agua alcanzada. Puede resultar que al aumentar la altura de agua al interior del cilindro aumente el potencial gravitacional del agua, lo que muchas veces hace variar la velocidad de infiltración

Cálculos y resultados

En la **tabla 1** se presenta una hoja de registros de infiltración con datos originales, obtenidos en terreno, y su consiguiente representación en la **Figura 3**.

TABLA 1. HOJA DE REGISTRO PARA UNA MEDICION DE INFILTRACION ACUMULADA (Iac) Y VELOCIDAD DE INFILTRACION (VI), UTILIZANDO CILINDRO INFILTROMETRO.

Lectura N°	Tiempo (min)	Lectura (cm)	σ Tiempo (min)	Ainf (cm)	Iac (cm)	VI (cm/min)
1	0	21.5	-	-	-	-
2	1	20.8	1	0.7	0.7	0.700
3	2	20.2	1	0.6	1.3	0.600
4	3	19.7	1	0.5	1.8	0.500
5	4	19.3	1	0.4	2.2	0.400
6	5	19.0	1	0.3	2.5	0.300
7	10	18.0	5	1.0	3.5	0.200
8	15	17.2	5	0.8	4.3	0.160
9	20	16.5	5	0.7	5.0	0.140
10	25	15.9	5	0.6	5.6	0.120
11	30	15.5	5	0.4	6.0	0.080
12	40	14.8	10	0.7	6.7	0.070
13	50	14.2	10	0.6	7.3	0.060
14	60	13.7	10	0.5	7.8	0.050
15	75	13.0	15	0.7	8.5	0.047
16	90	12.4 (18.0)	15	0.6	9.1	0.040
17	105	17.5	15	0.5	9.6	0.033
18	120	17.0	15	0.5	10.1	0.033

El intervalo de tiempo (σT), se refiere al tiempo transcurrido entre una lectura y otra. La altura de agua infiltrada (Ainf) se obtiene de la diferencia de altura entre una lectura y otra. La infiltración acumulada (Iac) es la suma de las alturas de agua (Ainf) que se han infiltrado desde el comienzo de la medición y la velocidad de infiltración (VI) se obtiene al calcular en dimensiones de velocidad la altura de agua infiltrada (Ainf) en un cierto intervalo de tiempo (σT). Por ejemplo, entre las lecturas 2 y 3 ha transcurrido

un minuto y la altura de agua en el cilindro ha disminuido 0.6 cm, lo que da una VI = 0.6 cm/min. Es importante establecer que la VI se debe representar en las mismas unidades, es decir si el tiempo está en minutos la VI debe estar en cm/minuto

Los datos de la **Figura 3**, nos indican que la velocidad de infiltración es alta en los inicios del riego para, posteriormente, disminuir y hacerse constante hacia los 120 minutos. Por otra parte, la altura de agua que se ha infiltrado desde el comienzo del riego (Infiltración acumulada), siempre aumentará variando solamente la pendiente.

De este modo, sabemos que si el agua está, por ejemplo, 25 minutos mojando el suelo, se habrán infiltrado 5,6 cm, que equivalen a 56 lt/m² ó a 560 m³/ha.

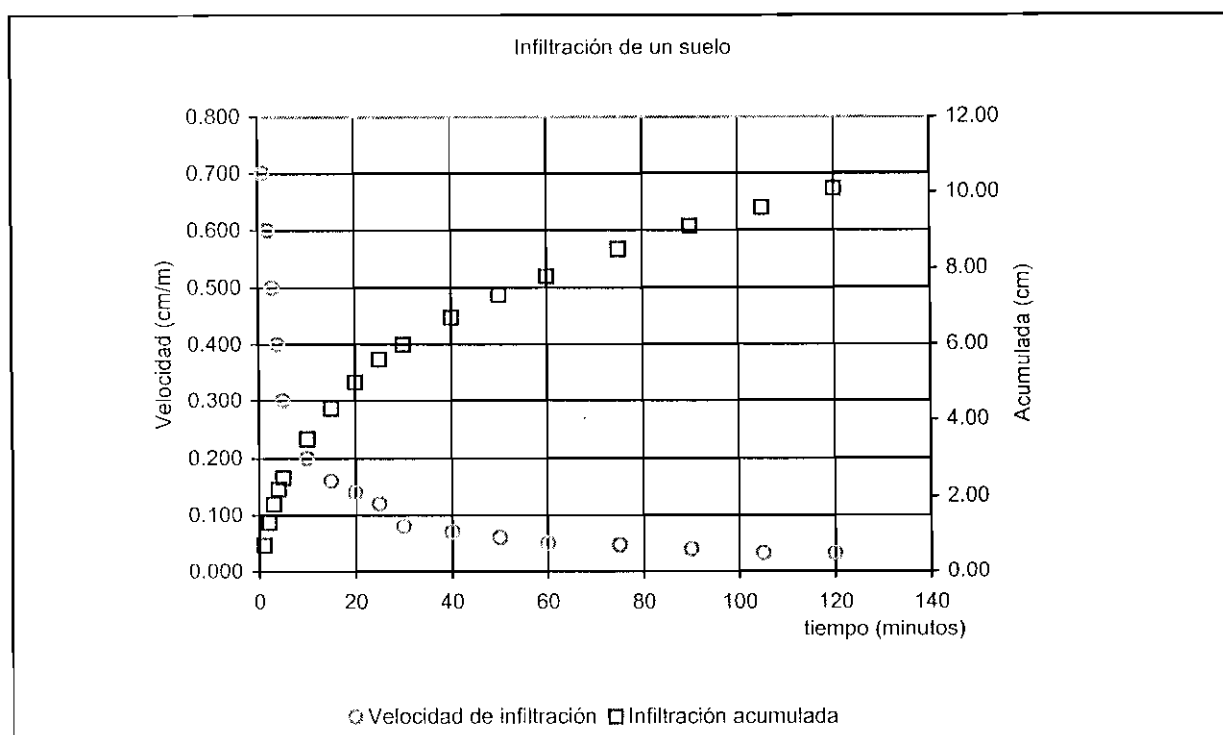


Figura 3. Gráfico normal que representa la infiltración de un suelo

Un manejo matemático más elaborado puede realizarse si se grafican los valores obtenidos en un papel logarítmico, obteniéndose un ajuste del tipo lineal (Figura 4). Esta línea es representada por la ecuación logarítmica $y = a * x^b$, en la que el parámetro "a" corresponde a la intersección de la recta con el eje "y" para $x=1$ y "b" corresponde a la pendiente de la recta y se calcula midiendo su inclinación con una regla métrica.

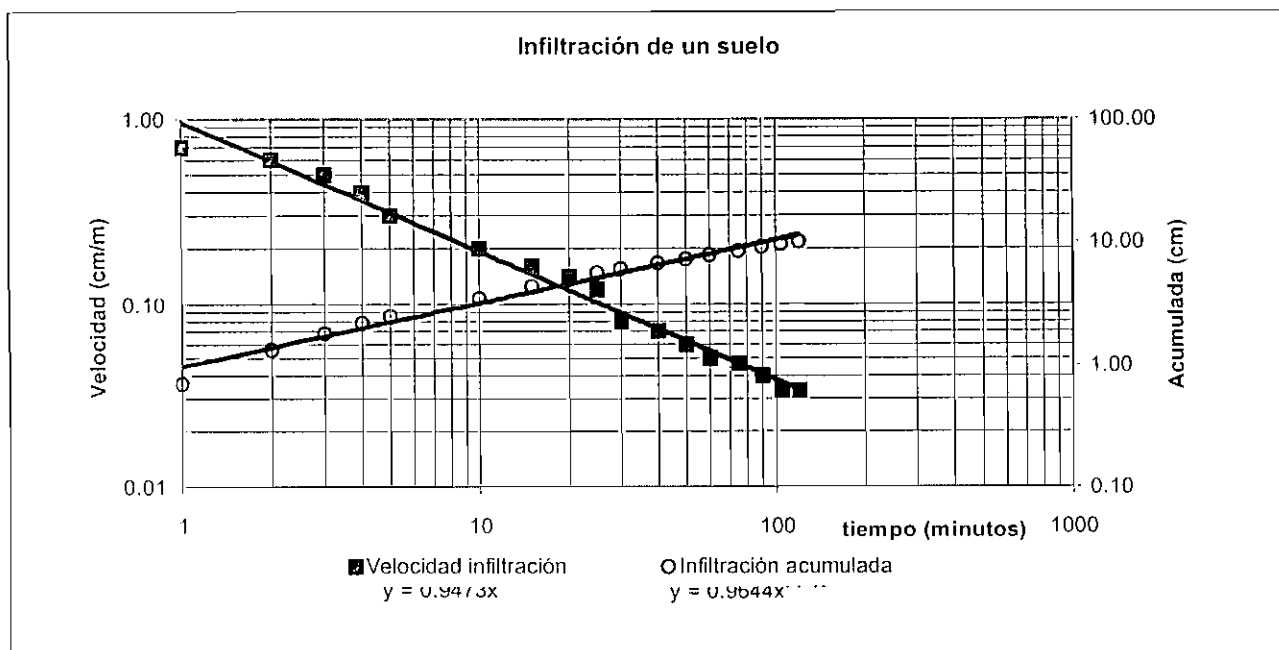


Figura 4. Gráfico logarítmico que representa la infiltración de un suelo.

Este tipo de ecuación:

$$I_{ac} = K * T^n$$

conocida como la ecuación de Kostiakov, representa la Infiltración Acumulada (Iac) en un cierto tiempo (T). El parámetro "K" es el intercepto de la curva en el minuto 1 y se obtiene directamente del gráfico en el papel logarítmico. El parámetro "n" es la pendiente de la recta y se obtiene midiendo, directamente en el gráfico la relación entre "x" e "y". Para un cálculo más preciso de la ecuación de Kostiakov es necesario un ajuste estadístico mediante la regresión logarítmica de los datos (Anexo1).

3.2 SURCO INFILTROMETRO

Dadas las características del riego por surcos, sólo una parte del terreno está en contacto con el agua; así, la infiltración se produce a través del perímetro húmedo del surco. Por tanto, la infiltración total de agua en el suelo depende tanto del perímetro húmedo, como de las características hidráulicas del surco.

Otros aspectos importantes a considerar son el contenido de humedad del suelo, que hace variar la velocidad de infiltración y el número de riegos dados en el surco. Esto último, porque la rugosidad, forma del surco y otras características hidráulicas cambian conforme aumentan los riegos dados.

La forma de medir infiltración en surcos, que se expondrá a continuación, es conocida como el método del surco infiltómetro o método de entrada-salida. Consiste, básicamente, en determinar las diferencias entre el caudal de entrada y salida en un surco, y su variación en el tiempo. Este método considera la infiltración sobre un segmento relativamente largo del surco.

Materiales

Los materiales utilizados para la determinación son: Huincha de 50 metros, cronómetro, nivel topográfico, estructuras de aforo, sifones o tubos rectos de PVC, balde calibrado, barrenos, cápsulas de aluminio, cilindros densidad aparente y hoja de registro "surco infiltómetro"

Procedimiento

Para realizar la determinación de la infiltración en este método se deberá:

* Seleccionar 3-4 surcos contiguos y uniformes .

Se utilizan tres surcos si el espaciamiento entre ellos es el mismo, y cuatro surcos si estos son pareados.

*Instalar en la cabecera del surco central alguna estructura de aforo: canoa Parshall, canoa fondo plano, sifones o baldes previamente calibrados, con el propósito de medir el caudal de entrada al surco. A su vez, para aforar el caudal de salida, también se debe instalar una estructura de aforo en el extremo final del surco; o en su lugar, hacer una excavación con el fin de introducir un balde de volumen conocido (Figura 5).

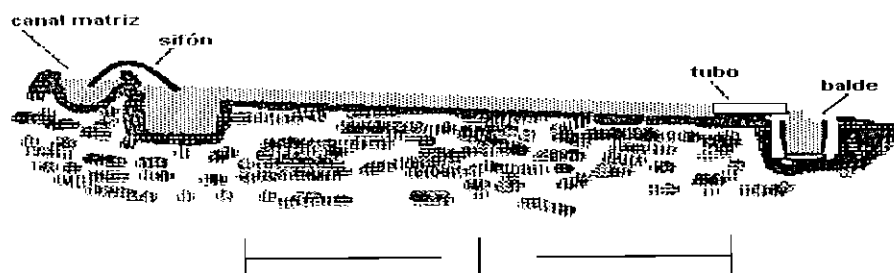


Figura 5. Esquema de instalación de un surco infiltrómetro.

La distancia (L) entre la cabecera del surco y el extremo inferior varía dependiendo del tipo de suelo. En suelos arenosos, esta distancia no debe ser mayor a 30 m; en cambio, en suelos arcillosos puede variar entre 50 y 80 m.

Lectura de datos

*Después de seleccionado el caudal a usar normalmente en el riego, se deriva el agua a los surcos de ensayo. Aquí ocurre el primer inconveniente ó pregunta: ¿Qué caudal utilizar? Puede ser el caudal máximo no erosivo, el caudal reducido, un promedio de ambos, ó el caudal que normalmente utiliza el regador. Esto es importante y se debe recordar que a mayor caudal conducido por el surco, mayor será la infiltración o cantidad de agua que pasa a la zona de raíces, pues aumenta el perímetro humedo.

*Al momento de entrar el agua al surco seleccionado, se registra la hora. Además, se debe dejar escurrir el agua en los surcos vecinos con el propósito de uniformar el perfil de humedecimiento. También, es necesario tratar de mantener constante el caudal de entrada, razón por la cual es aconsejable derivar el agua mediante sifones o tubos rectos, manteniendo constante la carga o altura de agua en el canal de aducción.

*Se registra el tiempo que demora el agua en llegar al extremo final del surco seleccionado. A partir de ese momento y cada ciertos intervalos de tiempo, se realizan simultáneamente las lecturas de los caudales en ambos extremos del surco, ya sea usando un balde calibrado y cronómetro o alguna estructura de aforo. Se recomienda en los primeros 10 minutos hacer de 3-4 mediciones, para después espaciarlas cada 5 a 10 minutos hasta completar aproximadamente 2 horas de medición.

Otro criterio de término de medición de infiltración, es que se debe realizar hasta el momento en donde el caudal que pasa por el extremo final del surco se haga constante. Esto indicaría que la velocidad de infiltración también se ha hecho constante (suponiendo que el caudal en la cabecera del surco no varía durante el período de medición).

Cálculos y resultados

Para proceder a la elaboración de la información obtenida, se propone un cuadro de tabulación (Tabla 2), en donde la velocidad de infiltración en surco se calcula mediante la siguiente relación :

$$VI = (Q * 6) / (L * P)$$

En donde :

VI = velocidad de infiltración, en cm/minuto

Q = diferencia entre el caudal de entrada y el de salida, para un tiempo dado, en l/s

L = largo del surco, en m

P = perímetro mojado, en m

TABLA 2. TABULACION DE REGISTRO DE VELOCIDAD DE INFILTRACION EN SURCOS INFILTROMETRO.

Surco L = 30 m y P = 0,3 m.

Hora	Tiempos (min)			Caudales (l/seg)			VI (cm/min)
	Entrada	Salida	Promedio	Entrada	Salida	Diferencia	
08:00	inicio						
08:1515	0		2.2		---		
08:1616	1	008.1	2.2	1.35	0.85	0.57	
08:1818	3	010.5	2.2		1.53	0.67	0.45
08:2020	5	012.5	2.2		1.78	0.42	0.28
08:2525	10	017.5	2.2		1.85	0.35	0.23
08:3030	15	022.5	2.2		1.91	0.29	0.19
08:4040	25	032.5	2.2		1.95	0.25	0.17
08:5050	35	042.5	2.2		2.01	0.19	0.13
09:0060	45	052.5	2.2		2.03	0.17	0.11
09:1575	60	067.5	2.2		2.06	0.14	0.09
09:3090	75	082.5	2.2		2.08	0.12	0.08
10:00120	105	112.5	2.2		2.10	0.10	0.07

El tiempo promedio se obtiene de la semi-suma de los tiempos de entrada y salida e indica el tiempo que ha permanecido el agua en el surco.

Finalmente, para obtener la ecuación de infiltración, se llevan a papel log-log los datos de VI y tiempo promedio (**Figura 6**), en donde el valor de la ecuación de velocidad de infiltración así obtenida es :

$$VI = 2.44 * T^{-0.779} \quad VI = \text{cm/min} , T = \text{minutos}$$

Finalmente, la ecuación de infiltración acumulada se obtiene integrando velocidad de infiltración:

$$VI = K * T^{-n}$$

$$\int K * t^{-n} dx = K / -n+1 * T^{-n+1} + C$$

donde:

C = constante de integración, valor que se utiliza para corregir las cifras cuando el gráfico en el papel log-log no resulta una recta.

Reemplazando los valores obtenidos :

$$Iac = 2.4455 / -0.7786+1 * T^{-0.7786+1}$$

$$Iac = 11.045 * T^{0.2214}$$

Donde :

Iac = infiltración acumulada en centímetros, K = constante de la ecuación de velocidad de infiltración, n = exponente de la ecuación de velocidad de infiltración y T = tiempo de infiltración transcurrido en minutos.

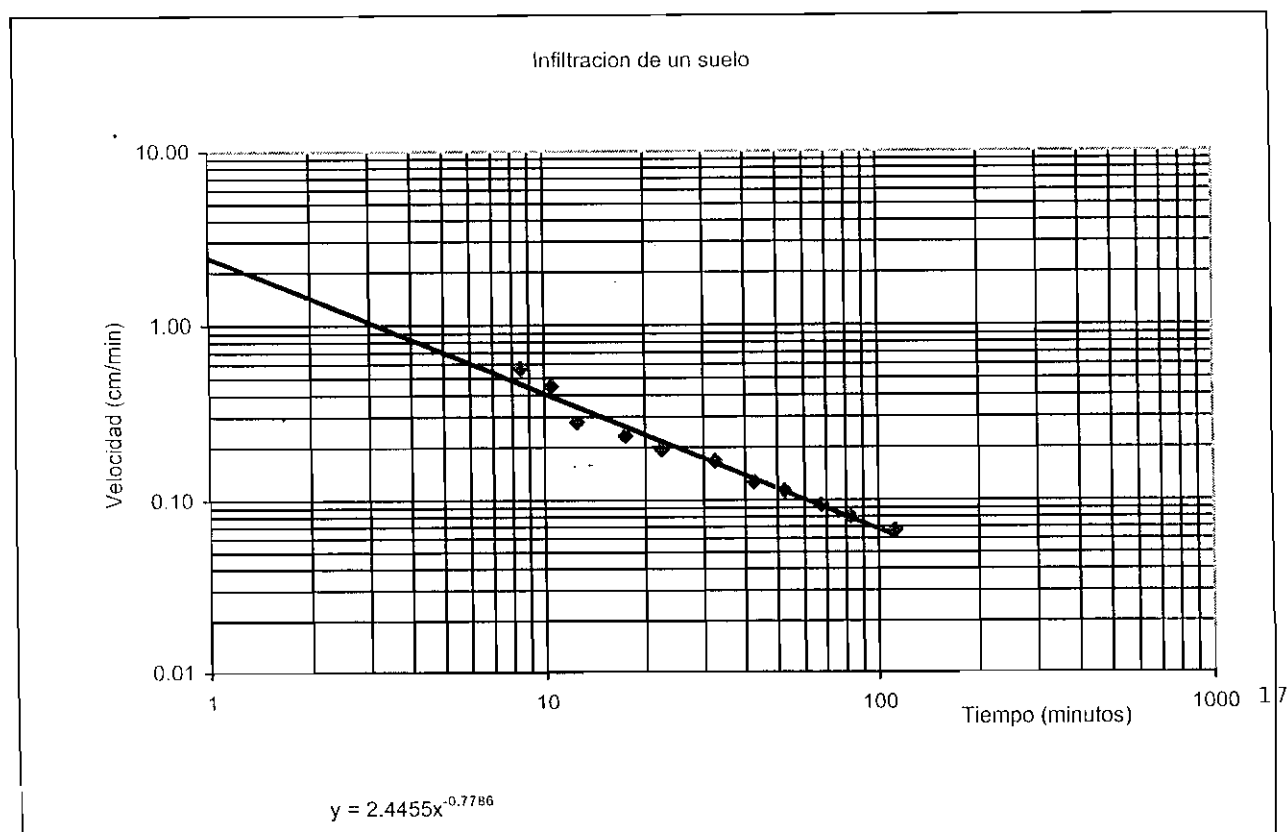


Figura 6. Gráfico logarítmico de velocidad de infiltración

3.2. METODO DE LOS 2 PUNTOS

Con el propósito de determinar un tiempo de riego adecuado en surcos, utilizando la ecuación de Kostiakow, se presenta una metodología simple de ejecutar, conocida como "dos puntos", la cual fue desarrollada por Elliot y Walker (1982).

También se le conoce como "método del punto medio y final". Es una metodología simple de ejecutar y consiste básicamente en anotar el tiempo en que el agua llega a la mitad y al final del surco y medir el área de conducción a esos tiempos.

Procedimiento

- * Seleccionar tres surcos contiguos de largo L (120-100 m) en el terreno previamente seleccionado, cuidando que no haya materiales extraños que obstaculicen el normal escurrimiento del agua.

- *Excavar en el extremo superior del surco cavidades donde colocar un balde para medir volumétricamente el caudal de entrada al surco, o bien aforar utilizando algunos de los métodos ya descritos anteriormente.

- *Medir la sección del surco al inicio del surco y a la distancia $L/2$ y $L/4$, tal como se indica en la Figura 7. De este modo, durante el riego, sólo será necesario medir la profundidad del agua para determinar la sección conductora de agua.

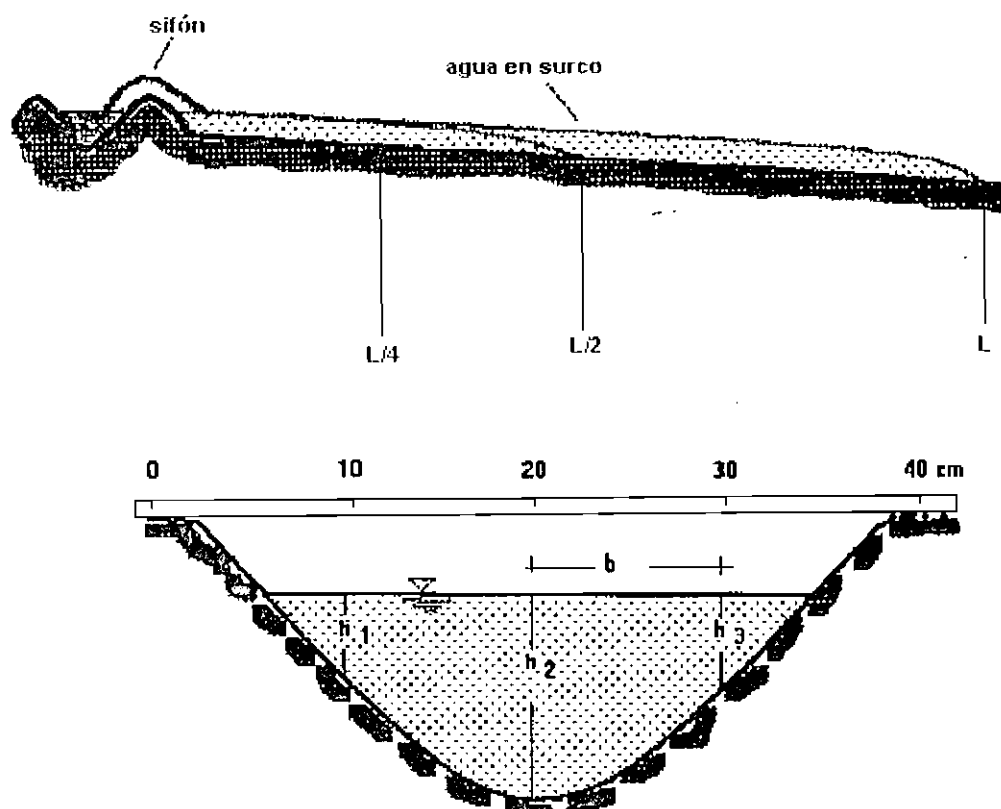


Figura 7. Esquema para la medición de tiempos y área en el método de los 2 puntos.

Lectura de datos

*Anotar la hora del momento de entrada del agua al surco infiltrómetro. Además, se deberá dejar escurrir el agua en los surcos vecinos al mismo tiempo, con el objeto de uniformar la humedad del perfil. Es importante mantener constante el caudal de entrada.

*Cuando el agua haya recorrido la distancia $L/2$, anotar la hora del suceso y medir la sección del surco que conduce agua, tanto en la cabecera como a la distancia $L/4$.

*Una vez que el agua llegue al final del surco, de largo L , anotar la hora y medir la sección conductora en la cabecera y a la distancia $L/2$.

Cálculos y resultados

Las ecuaciones a utilizar son la siguientes :

$$I_a = A * T^B$$

En donde :

Ia = infiltración de agua en el surco, en m³/min/m de largo de surco.
 A = constante de infiltración acumulada
 B = exponente de infiltración acumulada
 T = tiempo que debe permanecer el agua en el surco para que se infiltre un volumen Ia.

Para obtener A, se utiliza :

$$A = \frac{\alpha * (B + 1) * (r + 1)}{(B + r - r*B + 1) * (T_L)^B}$$

En donde T_L es el tiempo que demora el agua en recorrer la distancia L del surco.

$$\alpha = V_L / L - As, L$$

Donde :

V_L = volumen de agua aplicado al surco, cuando ésta ha recorrido la distancia L, en m³; As = área promedio conductora de agua, obtenida a partir de la semi-suma del área en la cabecera y área medida a la distancia L/2, cuando el agua ha recorrido una distancia L, en m²

$$r = \ln 0.5 / [\ln((T_{L/2}) / T_L)]$$

Donde :

T_{L/2} = tiempo de demora el agua en recorrer la distancia L/2, en minutos y
 T_L = tiempo que demora el agua en recorrer la distancia L

$$B = [\ln (\alpha/\beta)] / \{\ln [T_L/(T_{L/2})]\}$$

$$\beta = (V_{L/2}) / (L/2) - As, L/2$$

En donde :

$V_{L/2}$ = volumen de agua aplicado al surco, cuando ésta ha recorrido la distancia $L/2$, en m^3 ; A_s = área promedio conductora de agua, obtenida a partir de la semi-suma del área en la cabecera y área medida a la distancia $L/4$, cuando el agua ha recorrido una distancia $L/2$ en m^2

Nota : En surcos con pendientes mayores al 0.5%, sólo es necesario medir la sección conductora en la cabecera del surco y multiplicar por 0.8 para obtener A_s a L y A_s a $L/2$.

Así,

$$\bar{A}_s \text{ a } L/2 \text{ y } \bar{A}_s \text{ a } L = 0,8 * \text{área en cabecera}$$

Mediciones de terreno y ejemplo de cálculo

Para facilitar el uso de esta metodología se entrega a continuación datos de terreno y su manipulación:

Largo del surco = 60 m

Pendiente = 0.6 %

Caudal utilizado = 1.26 l/s

Caudal de entrada al surco = 0.0756 m^3/min

Área de la sección conductora en la cabecera = 0.0014 m^2

Área de la sección conductora en $L/4$ cuando el agua llega a $L/2$ = 0.0011 m^2

Área de la sección conductora en $L/2$ cuando el agua llega a L (m^2) = 0.0010 m^2

Tiempo que demora el agua en llegar a $L/2$ = 5 min

Tiempo que demora el agua en llegar a L = 18 min

Dado que la pendiente del terreno es mayor al 0.5%, sólo es necesario medir la sección conductora en la cabecera y multiplicar por 0.8 para obtener con bastante exactitud A_s , L y $A_s, L/2$, es decir :

$$\bar{A}_s \text{ a } L = \bar{A}_s \text{ a } L/2 = 0.8 * 0.00140 \text{ m}^2 = 0.00112 \text{ m}^2$$

Cálculos :

* Cálculo de α (Ec 3)

$V_L = 0.0756 \text{ m}^3/\text{min} * 18 \text{ min} = 1.361 \text{ m}^3$ se han aplicado al surco cuando el agua ha recorrido la distancia L .

$$\alpha = V_L / L - A_s \text{ a } L = 1.3608 \text{ m}^3 / 60 \text{ m} - 0.00112 \text{ m}^2 = 0.022 \text{ m}^3/\text{m}$$

*Cálculo de r (Ec. 4)

$$r = \ln 0.5 / [\ln(5 / 18)] = 0.54$$

*Cálculo de β (Ec. 5)

$V_{L/2} = 0.0756 \text{ m}^3/\text{min} * 5 \text{ min} = 0.378 \text{ m}^3$ se han aplicado al surco cuando el agua ha recorrido la distancia $L/2$

$$\beta = (V_{L/2}) / L/2 - A_s \text{ a } L/2 = 0.378 \text{ m}^3 / 30 \text{ m} - 0.00112 \text{ m}^2 = 0.012 \text{ m}^2$$

*Cálculo de B (Ec. 5)

$$B = [\ln (0.022/0.012)] / \{\ln[18/5]\} = 0.47$$

*Cálculo de A (Ec. 2)

$$A = \frac{\alpha * (B+1) * (r+1)}{(B + r - r*B + 1) (TL)^B}, \quad \text{en m}^3/\text{m y T en minutos}$$

$$A = \frac{0.022 (0.47 + 1) (0.54 + 1)}{(0.47+0.54-0.54*0.47+1) (18)^{0.47}} = 0.0073 \text{ m}^3 / \text{m min}^B$$

Finalmente, el volumen de agua infiltrado por metro de largo de surco al tiempo T , puede ser determinado por la siguiente ecuación:

$$I_a = A * T^B$$

$$I_a = 0.0073 \text{ m}^3 \text{ m} / \text{min}^B * T^{0.47} \text{ min}^B$$

La representación de esta ecuación se entrega en la **Figura 8**. Así, si el agua ha estado en promedio en un punto del surco, un tiempo de 70 minutos, se ha infiltrado 0.0516 m³ en un metro de largo.

Para convertir dicho volumen en altura de agua, deberá conocerse el espaciamiento promedio entre los surcos (70 cm).

Así,

$$I_a = H_r * E \quad (7)$$

En donde :

H_r = altura de agua infiltrada o altura de agua a reponer, en mm

E =espaciamiento entre surcos, en metros

$$H_r = 0.0516 \text{ m}^3 / 0.7 \text{ m}^2 = 0.074 \text{ m}$$

H_r = 74 milímetros de altura de agua infiltrada

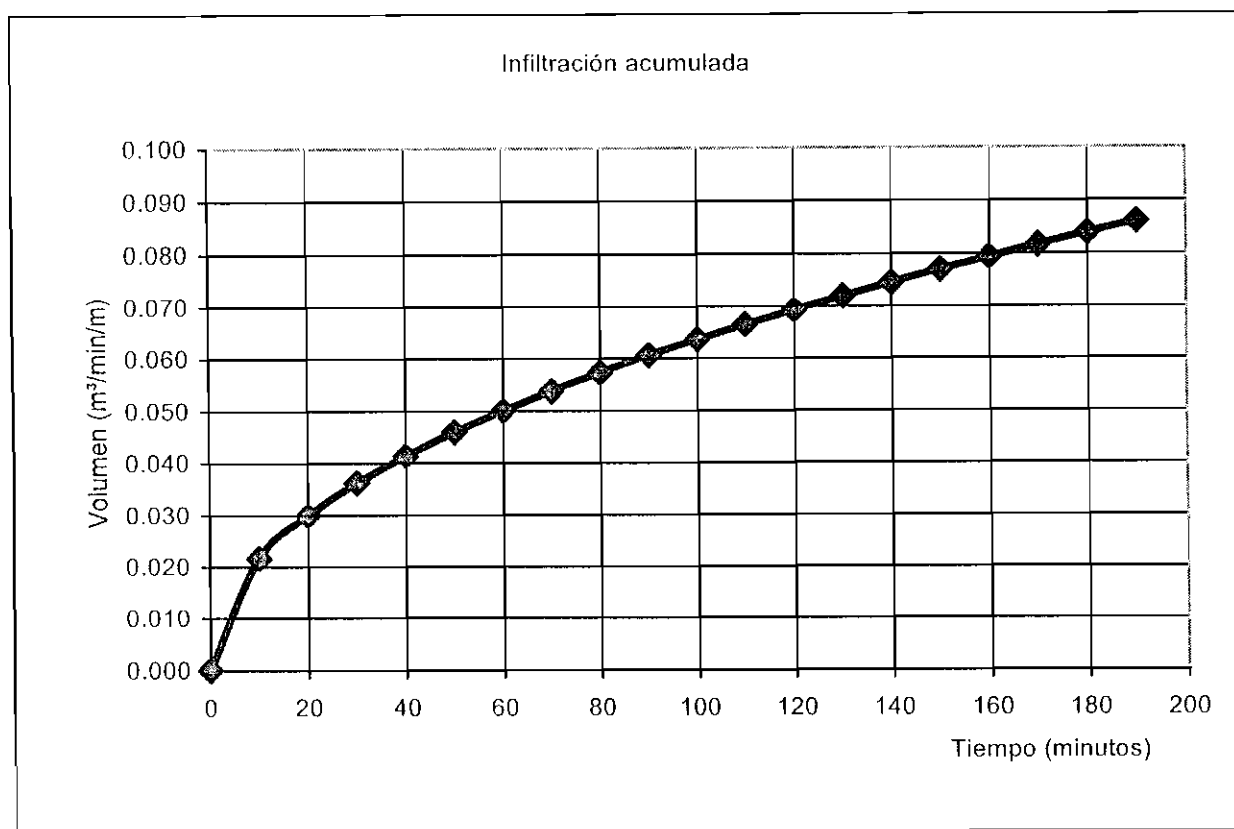


Figura 8. Representación gráfica de la Infiltración Acumulada

Dicho de otra manera, si la evapotranspiración entre riegos o la altura de agua necesaria para elevar el contenido de humedad a Capacidad de Campo fuese de 74 mm, es necesario que el agua permanezca en un punto del surco un tiempo mínimo de 70 minutos.

Este método, que ha sido debidamente probado y validado en el país (Bazán, 1987; Zuñiga Carmen, 1998), posee indudables ventajas de manejo y operación en terreno, haciendo mínimas las mediciones en comparación a otros métodos. La experiencia indica que una cuidadosa medición de las secciones, al inicio, a L/2 y L/4 del surco, inciden directamente en la confiabilidad y validez de la ecuación de infiltración obtenida.

3.4. METODO DEL AVANCE

Este es un método simple y la calidad de los resultados obtenidos son adecuados.

Al entregar un flujo constante de agua a un surco, parte del agua que avanza por el surco se infiltra y la otra queda en la superficie del surco.

La velocidad de infiltración puede ser evaluada si se conocen, en cualquier momento, el volumen de agua aplicada y el volumen almacenado en la superficie del surco.

Materiales

Los materiales utilizados en su determinación son:

Una huincha de 30 metros, estacas, cronómetro, nivel topográfico, sifones, balde calibrado, barrenos y cápsulas de aluminio.

Procedimiento

Para determinar los parámetros de riego de esta metodología se requiere:

- Seleccionar 3 surcos en el terreno previamente asignado.
- Cavar al inicio del surco, cercano al canal de aducción una cavidad donde colocar el balde para medir el caudal de entrada que está entregando el sifón.
- Observar los surcos seleccionados cuidando que no haya elementos que obstaculicen el normal escurrimiento del agua.
- Estacar un surco cada 5 metros.
- Muestrear el suelo para determinar el contenido de humedad antes del riego y la densidad aparente.
- Aplicar distintos caudales a los surcos, tratar que el caudal se mantenga constante y medirlo a intervalos regulares.
- Anotar el tiempo de inicio del riego y el tiempo en que llega a cada una de las estacas (avance). Una vez que el agua llega al final del surco, cortar el riego, anotar el tiempo de corte y el tiempo en que el agua desaparece frente a cada estaca (recesión).
- Medir el área de conducción al inicio y en la mitad del surco cuando el agua llegue a la mitad y al final del surco respectivamente.
- Muestrear el suelo 24-48 horas después de la experiencia para determinar el contenido de humedad después del riego.

Cálculos y resultados

* Con los datos obtenidos en un surco construir **tabla 3** :

Tabla 3. Registro de datos para el método del avance

Distancia de avance	Tiempo Avance	Volumen aplicado Caudal * t	Volumen en surco Area* Dist.	Volumen infiltrado
(metros)	(minutos)	(m ³)	(m ³)	(m ³)
0	0.0			
5	2.0	0.156	0.058	0.098
10	4.5	0.351	0.117	0.234
15	8.0	0.624	0.175	0.449
20	11.0	0.858	0.234	0.624
25	17.0	1.326	0.292	1.034
30	22.0	1.716	0.350	1.366
35	25.0	1.950	0.409	1.541
40	30.0	2.340	0.467	1.873
45	34.0	2.652	0.526	2.126
50	40.0	3.120	0.584	2.536
55	43.0	3.354	0.642	2.712
60	48.0	3.744	0.701	3.043
65	56.0	4.368	0.759	3.609
70	65.0	5.070	0.818	4.252
75	68.0	5.304	0.876	4.428
80	73.0	5.694	0.934	4.760
85	76.0	5.928	0.993	4.935
90	83.0	6.474	1.051	5.423
95	88.0	6.864	1.110	5.754
100	99.0	7.722	1.168	6.554

*Con los valores calculados graficar, en papel log-log, el **avance o distancia** en la abcisa o eje x y el **tiempo de avance** en la ordenada o eje y. Con el método gráfico ajuste la curva y determine las constantes a y b, que corresponden al valor de tiempo al avance unitario y la pendiente, respectivamente (**Figura 9a**).

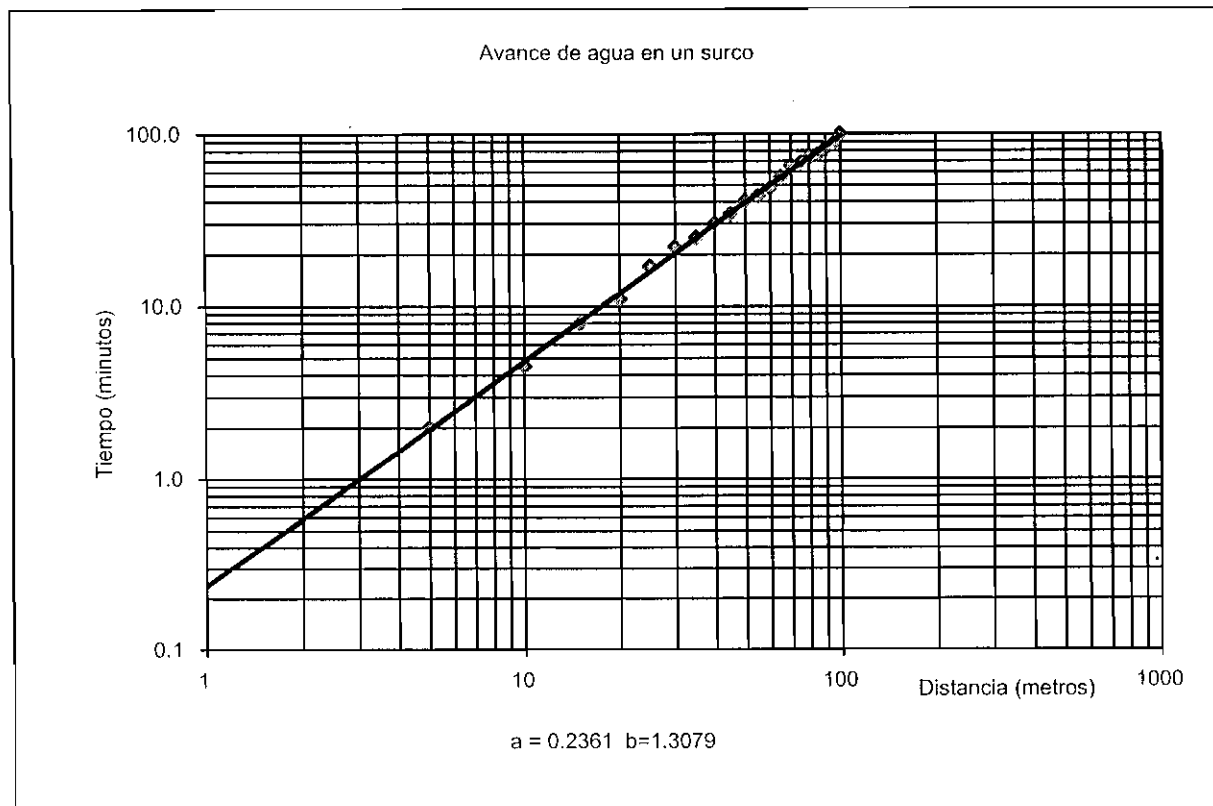


Figura 9a. Representación logarítmica de avance de agua en un surco

*Graficar, en papel log-log, el avance o distancia en eje X y volumen infiltrado en eje Y. Ajuste la curva y determine las constantes C y W, que corresponden al valor de volumen infiltrado a distancia unitaria y la pendiente respectivamente (Figura 9b).

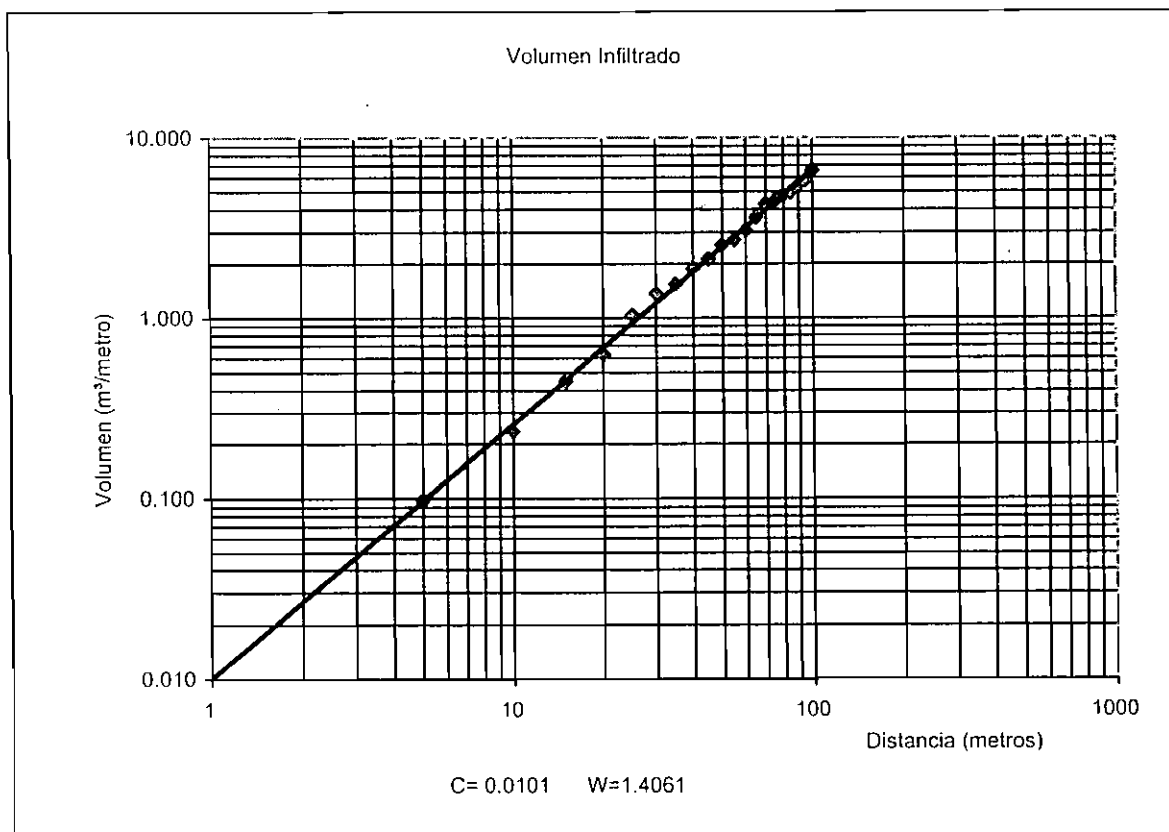


Figura 9b. Representación logarítmico de volumen infiltrado en un surco

*Calcular la pendiente n de la ecuación de Velocidad de Infiltración utilizando la ecuación :

$$n = ((W-1) / b) - 1$$

*Calcular la constante K de la ecuación de Velocidad de Infiltración mediante la ecuación :

$$K = (C (n+1) (b (n+1) + 1)) / (a * (n+1))$$

$$VI = K * T^{-n}$$

*Integrando, obtener la ecuación de infiltración acumulada.

$$I_{ac} = K / (n+1) T^{n+1}$$

$$I_{ac} = A + T B \quad \text{A en m}^3/\text{min por metro lineal de surco}$$

3.5. METODO PRACTICO

Esta metodología sólo representa una mera aproximación de estimación de la profundidad a la cual llega la humedad después de un riego. Para ello, en cuatro a cinco surcos no contiguos, claramente identificados, se deja correr el agua a diferentes tiempos. Ejemplo : 10, 30, 60 y 120 minutos. Estos valores dependen en gran medida de la textura del suelo y profundidad efectiva de raíces. Así, mientras más fina sea la textura y mayor la profundidad radical, deberán escogerse tiempos de riego mayores, que pueden llegar a 6 horas.

Uno o dos días después del riego, se procede a muestrear con barreno cada uno de los surcos, procurando determinar con la mayor exactitud posible, hasta qué profundidad llegó el frente húmedo. Esto se nota ya sea por el cambio de color del suelo o diferencias de humedad al tacto. Posteriormente, se tabula la información, tal como se muestra en la **tabla 4**.

TABLA 4. ESTIMACION DE LA PROFUNDIDAD DE HUMEDECIMIENTO (H) EN RIEGO POR SURCOS CON DIFERENTES TIEMPOS DE APLICACION DE AGUA (T).

	T (min)	H (cm)
Surco 1	10	30
Surco 2	30	60
Surco 3	60	90
Surco 4	120	130

Así, si la profundidad radical efectiva, para un período vegetativo determinado es de 100 cm, será necesario dejar corriendo el agua unos 70 minutos, después que ésta ha llegado al final del surco.

BIBLIOGRAFIA

1. DIAZ FRANCISCO, FUENZALIDA ENRIQUE. 1974. Comparación entre métodos para determinar velocidad de infiltración. Chillán, Chile. Universidad de Concepción, Escuela de Agronomía. 122 p. (tesis mimeografiada).
2. GRASSI, CARLOS. 1972. Métodos de riego. Mérida, Venezuela, CIDIAT. 270p.
3. HOLZAPFEL H., EDUARDO y VALENZUELA A., ALEJANDRO. 197 . Características hidráulicas en surcos de riego. Chillán, Chile, Universidad de Concepción, Boletín técnico N° 17, 47p.
4. HAGAN and OTHER. 1967. Irrigation of agricultural lands. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin.USA. 1180 p.

5. ISRAELSEN, ORSON Y HANSEN, V.E. 1965. Principios y aplicaciones del riego. 2º edición. Barcelona, España, Editorial Reverté, S.A. 396 p.
6. TOSSO T., JUAN y TONDREAU, A., JORGE. 1975. Velocidad de infiltración para diseño de métodos de riego. Santiago, Chile, Ministerio de Agricultura, Servicio Agrícola y Ganadero. 44 p. (Boletín Técnico).
7. GRASSI, CARLOS. 1972. Características de infiltración del riego por surco en un suelo de textura pesada. Mérida, Venezuela, CIDIAT. 165p. (Tesis doctoral).
8. HOLZAPFEL EDUARDO, VALENZUELA ALEJANDRO, DIAZ FRANCISCO, MARIÑO MIGUEL. 1986. Infiltration measuring method for surface irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering

MODELOS DE CALIDAD DE RIEGO

Profesor Dr. Eduardo A Holzapfel
Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola

La calidad del riego es una medida de su desempeño. El agua aplicada durante el riego debe cumplir, entre otros, los siguientes requisitos (Holzapfel,1984):

- Suministrar a la planta el agua requerida.
- Estar distribuida uniformemente sobre el área de riego.
- No exceder la capacidad de almacenamiento de agua del perfil del suelo para impedir la percolación profunda.
- Evitar la lixiviación del suelo más de lo requerido para prevenir la salinización
- Minimizar la erosión y el deterioro de la estructura del suelo.

En general se puede establecer que la calidad del riego es afectada por (Holzapfel,1984):

- La velocidad de avance del frente de agua en riego superficial.
- La velocidad de infiltración del agua en el suelo.
- El caudal de entrada.
- El tiempo de riego.
- El tiempo de recesión del agua desde la superficie del suelo.
- La humedad del suelo antes del riego.
- La variabilidad estructural del suelo (distintos tipos).
- Las condiciones climáticas, especialmente en riego por aspersión.
- Presión y espaciamiento entre los aspersores o emisores en sistemas de riego presurizado.

Los parámetros seleccionados para determinar el comportamiento de un riego deben ser capaces de estimar la calidad del riego (Holzapfel, 1984). Varios parámetros que describen la calidad de aplicación del agua de los métodos de riego han sido analizados por numerosos investigadores (Karmeli et al., citados por Holzapfel et al.1985). Sin embargo, se han encontrado problemas para evaluar efectivamente la calidad de un riego, debido a las dificultades para identificar fallas en la operación o diseño (Hall, 1960 ; Merriam and Keller, 1978). La calidad del riego sólo puede ser determinada usando varios modelos, pues uno solo no es capaz de entregar un análisis total de un riego (Holzapfel,1984). Para el presente estudio analizaremos sólo cuatro modelos para medir la calidad de un riego: eficiencia de aplicación del agua (EA), eficiencia de requerimiento o eficiencia de almacenamiento de agua (ER), eficiencia de distribución de requerimiento (EDR), y eficiencia de distribución total (EDT).

A.- Eficiencia de aplicación.

El On-Farm Irrigation Committee de la Irrigation and Drainage Division de la ASCE (1978) definió la eficiencia de aplicación del agua (EA) como la razón entre el volumen de agua retenida en la zona radicular después del riego y el volumen total de agua aplicada en un riego (ver figura 3). Su expresión matemática es:

$$EA = \frac{\text{Volumen de agua almacenado en la zona radicular}}{\text{Volumen de agua aplicada al campo irrigado}} \cdot 100 \quad [1]$$

La eficiencia de aplicación del agua describe sólo la fracción de agua aplicada almacenada dentro de la zona radicular que es potencialmente accesible para el proceso de evapotranspiración. Este coeficiente no es adecuado para describir la calidad global de un riego debido a que no especifica la uniformidad de un riego, como tampoco si éste cumplió con las necesidades de la planta o cultivo.

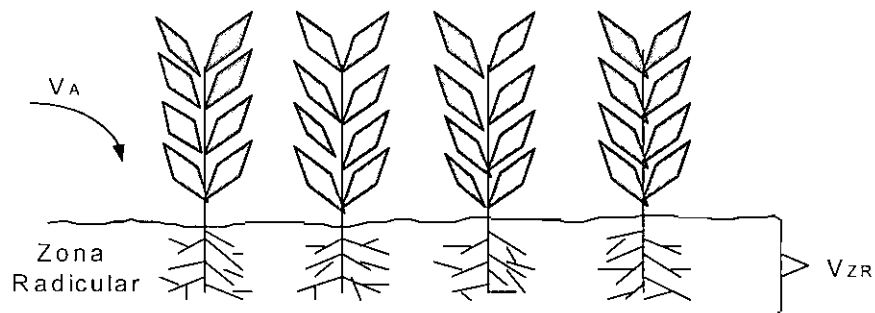


Figura 3. Esquema explicativo de Eficiencia de Aplicación: V_{ZR} = volumen almacenado en la zona radicular; V_A = volumen aplicado. (Holzapfel, 1984)

B.- Eficiencia de requerimiento.

Hansen (1960) desarrolló tres conceptos de eficiencia para describir más adecuadamente la calidad de un riego : (1) eficiencia de requerimiento o eficiencia de almacenamiento de agua (E_R), el cual está hecho para describir si el riego fue adecuado; (2) la eficiencia de distribución del agua (E_d) la cual es idéntica al concepto de coeficiente de uniformidad de Christiansen (1942), que mide la uniformidad en la distribución del agua; y (3) eficiencia de uso-consumo (E_u) el cual establece la habilidad de la planta para usar el agua almacenada. La eficiencia de requerimiento puede ser definida como:

$$ER = \frac{\text{Volumen de agua almacenado en zona radicular}}{\text{Volumen de agua requerido}} \cdot 100 \quad [2]$$

El ER es importante cuando el agua almacenada en la zona radicular es insuficiente para cubrir los requerimientos del cultivo (ver figura 4). Valores bajos de ER pueden deberse a situaciones de alto costo del agua, escasez de agua, conocimientos inadecuados de los requerimientos de agua del cultivo, mala distribución del agua infiltrada y factores de diseño u operación.

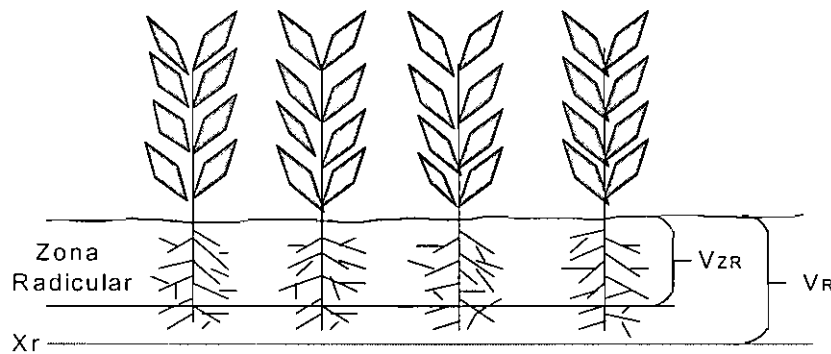


Figura 4. Esquema explicativo de la Eficiencia de Requerimiento: V_R = volumen requerido ; V_{ZR} = volumen almacenado en la zona radicular; X_r = prof. requerida. (Holzapfel, 1984)

C.- Eficiencia de distribución del requerimiento.

Holzapfel (1984), propuso los conceptos de eficiencia de distribución del déficit (EDD), eficiencia de distribución del requerimiento (EDR), que miden los efectos de la distribución del agua aplicada en relación al requerimiento de los cultivos. En

el caso de EDD y EDR se asume que la producción del cultivo no es afectada seriamente por la percolación profunda.

La eficiencia de distribución del requerimiento (Holzapfel 1984), se define como:

$$EDR = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^m |X_i - X_r|}{n \cdot X_r} \right] \cdot 100 \quad X_i \leq X_r [3]$$

donde:

X_i : es la altura de agua infiltrada en el punto i (mm o m)

X_r : es la altura de agua requerida por el cultivo (mm o m).

m : es el número de observaciones donde X_i fue menor o igual a X_r .

n : es el número total de observaciones.

La eficiencia de distribución del requerimiento (EDR) muestra como ha sido la distribución del agua en los puntos con déficit respecto al agua requerida(ver figura 5). Su valor nos indica el porcentaje del área o superficie irrigada que ha recibido la cantidad de agua requerida por el cultivo.

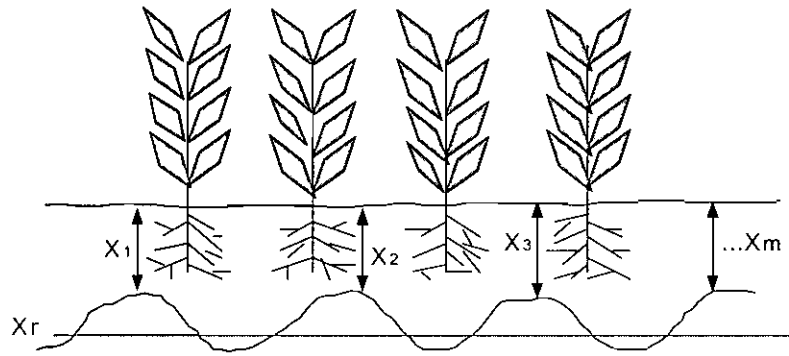


Figura 5. Esquema explicativo de la Eficiencia de Distribución del Requerimiento
 X_r = prof. de agua requerida ; X_i = prof. de agua observada en cada pto. i, tal que $X_i \leq X_r$. (Holzapfel, 1984)

D.- Eficiencia de distribución total.

La eficiencia de distribución total describe la distribución del agua en relación al requerimiento, incorporando tanto los puntos con déficit como con exceso (Holzapfel, 1984). La eficiencia de distribución total se define como:

$$E D T = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - X_r|}{n \cdot X_r} \right] \cdot 100 \quad [4]$$

donde:

X_i : es la altura de agua infiltrada en el punto i (mm).

X_r : es la altura de agua requerida por el cultivo (mm).

n : es el número total de observaciones.

La eficiencia de distribución total (EDT) muestra como ha sido la distribución del agua en el total de los puntos respecto al agua requerida (ver figura 6). Analiza la variación de la altura de agua infiltrada respecto a la altura requerida. De esta manera, cuando el riego es adecuado y se registran pequeñas variaciones de altura de agua infiltrada, el valor de EDT es alto. Por el contrario, cuando el riego es de mala calidad y se observan grandes variaciones de altura de agua infiltrada, el valor de EDT es bajo.

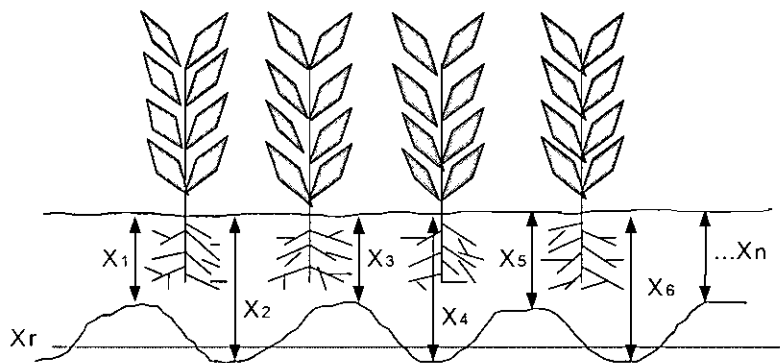


Figura 6. Esquema explicativo de la Eficiencia de Distribución Total ; X_r = prof. de agua requerida ; X_i = prof. de agua observada en cada pto. i. (Holzapfel, 1984.)

E.- Coeficiente de Uniformidad

Los coeficientes de uniformidad (CUC) utilizados en el presente estudio fueron el coeficiente de uniformidad de Christiansen y el del Cuarto Menor.

El Coeficiente de Uniformidad de Christiansen es una representación estadística de la uniformidad del riego en relación a la media y está definida de la siguiente forma:

$$CUC (\%) = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \bar{x}} \right] * 100 \quad (5)$$

Donde, x_i es el caudal de agua en el emisor i (l/h), $\bar{x}$ es el caudal promedio de los n emisores evaluados (l/h) y n es el número total de emisores evaluados.

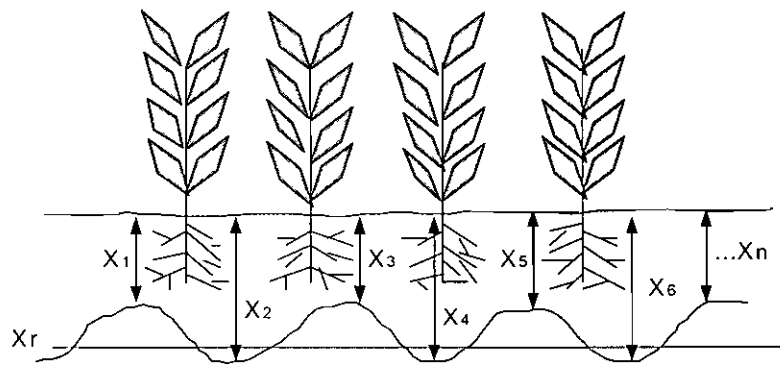


Figura 6. Esquema explicativo de la Eficiencia de Distribución Total ; X_r = prof. de agua requerida ; X_i = prof. de agua observada en cada pto. i . (Holzapfel, 1984)

El Coeficiente de Uniformidad del Cuarto Menor se puede expresar de la siguiente manera:

$$CUCM = \frac{x_{25}}{x_x} \quad \{9\}$$

Donde: x_x es el caudal medio entregado por los n emisores evaluados. x_{25} es el caudal medio entregado por el 25% de los emisores de menor caudal.

LITERATURA

1. Hall, W.A., 1960. Performance parameters of irrigation systems. Transaction of the ASAE, 3(1): 75-81.
2. Hansen, W., 1960. New concepts in irrigation efficiency. Transaction of the ASAE, 3(1): 55-64.
3. Holzapfel, E.A., 1984. Selection and Design of Surface Irrigation Methods. Tesis de doctorado. University of California, Davis. California, U.S.A.
4. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño and J. Chávez, 1984. Comparision and selection of furrow irrigation models. Agricultural Water Management, 9:105-125.
5. Holzapfel, E.A., M.A. Mariño and J. Chávez, 1985. Performance irrigation parameters and their relationship to surface-irrigation design variables and yield. Agricultural Water Management, 10:159-174.
6. Merriam, J.L. and J. Keller, 1978. Farm irrigation system evaluation. A guide for management. Utah State University, Logan. Utah. U.S.A.
7. On-Farm Irrigation Committee of the Irrigation and Drainage Division, 1978. Describing irrigation efficiency and uniformity. Journal of the irrigation and drainage division. ASCE, 104(IR1): 35-41.

Impacto de las Actividades Agrícolas en los Recursos Hídricos

Darrell G. Watts¹

James S. Schepers²

Summary

The effort to feed and clothe a growing population has stimulated the intensification of agriculture in many parts of the world. One unintended consequence has been increased movement of nutrients, particularly phosphorus and nitrogen, from agricultural lands into both surface water and ground water, as well as into coastal marine ecosystems. In the United States excessive land application of manure from intensive livestock and poultry production has contributed to eutrophication of lakes and reservoirs by phosphorous. Nitrate-nitrogen leached from the root zone of corn and other crops requiring high nitrogen inputs has contaminated surface streams and ground water in many parts of the country. Nitrate from the US Cornbelt has contributed to the development of contamination of many bays along all coasts of the country, including a large hypoxic area in the Gulf of Mexico near the mouth of the Mississippi river. Widespread adoption of available technologies and better management strategies could significantly reduce nutrient loss. However, this may not be sufficient to control the problem within acceptable limits, particularly in the case of nitrogen. Further reduction of N fertilizer applications through adoption of technologies now under development will be required over the next decade if losses are to be sufficiently limited to meet society's need for clean water.

Introducción

El continuo crecimiento de la población mundial ha creado también una creciente demanda por alimentos y fibras. Al mismo tiempo, el área disponible para la producción agrícola está declinando debido a que las áreas urbanas siguen expandiéndose y reemplazando áreas agrícolas en todo el mundo. En algunos países de América Latina y África, aún existe tierra disponible para ser convertida a la producción agrícola. Aún así, áreas agrícolas adyacentes a poblados y ciudades en crecimiento siguen siendo urbanizadas. Esto fuerza a los agricultores de subsistencia a establecerse en tierras marginales, las cuales tienen un bajo potencial agrícola y que frecuentemente son muy susceptibles a la erosión y degradación. Esta situación ha acelerado la tendencia hacia la producción agrícola intensiva en las tierras que poseen un mayor potencial productivo.

En los últimos 30 años, ha habido un gran incremento en la productividad de cultivos como el

¹ Profesor Emeritus, Departamento de Ingeniería de Sistemas Biológicos, Universidad de Nebraska, Lincoln, Nebraska, EE.UU.

² Líder de Investigación, Servicio de Investigación Agrícola/ Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Lincoln, Nebraska. EE.UU.

arroz, el trigo y el maíz. Hoy en día, más gente consume una mejor dieta que en ningún otro tiempo. Esto es el resultado de al menos tres factores principales: 1) Investigación, que ha desarrollado nuevas variedades de cultivos que responden con altos rendimientos a la aplicación de fertilizantes, siempre que exista una disponibilidad adecuada de agua, 2) Paquetes tecnológicos, que proveen niveles crecientes de protección contra malezas, plagas y enfermedades, 3) Programas de extensión agrícola, que enseñan a los agricultores cómo aplicar las nuevas tecnologías. En zonas donde las lluvias no son confiables y donde han existido recursos hídricos disponibles, el desarrollo o expansión del riego ha sido una parte integral del paquete tecnológico. Paralelamente con el aumento en la producción de granos, también se ha intensificado la producción bovina, porcina y avícola en muchas partes del mundo. La acuicultura es también una industria en crecimiento, tanto con especies de agua dulce como de agua salada.

Desafortunadamente, estos aumentos en la producción de alimentos y fibras no se han producido sin un costo al medio ambiente. En algunos casos, el costo ha sido mayor que el anticipado y a veces, inesperado. La contaminación de aguas superficiales y subterráneas con nutrientes, particularmente con fósforo (P) y nitrógeno (N) ha resultado en una serie de problemas. Estos incluyen la eutroficación de cuerpos acuáticos, concentraciones inaceptables de nitrato en las fuentes de agua potable de muchos poblados y ciudades, especialmente en zonas de producción agrícola intensiva, y el aumento en el transporte de nutrientes hacia estuarios marinos y hacia el mar, creando zonas hipóxicas, casi exentas de peces y del tipo de vida marina que normalmente habita en el fondo del mar.

Las regiones irrigadas no se han escapado de los problemas ambientales. Alrededor del mundo existen ejemplos notables de proyectos de riego en donde la producción agrícola ha disminuido o cesado por completo debido a que no fueron provistos con los drenajes necesarios para controlar la salinización de los suelos. Además, donde no se han empleado tecnologías modernas de riego, la tendencia de aplicar agua en exceso ha acelerado la lixiviación de nutrientes solubles desde la zona radicular hacia el agua subterránea. La buena noticia es que nosotros, como sociedad, hemos empezado a reconocer la existencia de estos problemas y estamos empezando a tomar los pasos necesarios para resolverlos. Este es un gran reto para el futuro. Nosotros no sólo debemos encontrar maneras de enfrentar los problemas causados por nuestras previas acciones, sino que también debemos buscar maneras de limitar los posibles impactos ambientales resultantes de producir cada vez más y más alimentos para la creciente población mundial.

Este documento resume algunas de las causas y consecuencias ambientales de la contaminación de los recursos hídricos debido al movimiento de nutrientes de origen agrícola. Los autores también indicarán los pasos que pueden seguirse para controlar la pérdida de nutrientes y reducir los niveles de contaminación. La discusión presentada en este documento está basada en los resultados y experiencias que hemos obtenido en las zonas templadas de los Estados Unidos³. Los autores entienden que estas experiencias podrían no tener aplicación directa en algunas partes del hemisferio sur. Sin embargo, esperamos que sean útiles en zonas donde las condiciones de suelo

³ Un resumen general del impacto de la agricultura en la calidad del agua a nivel mundial fue presentado por Ongley, 1997.

y clima sean similares. De todos modos, esperamos ayudar a evitar algunos de los problemas más serios de contaminación de los recursos hídricos con nutrientes de origen agrícola que se pueden observar en los Estados Unidos y en otras regiones del hemisferio norte.

Eutroficación de Recursos de Agua Dulce

El Problema

La eutroficación es un proceso natural que se torna nocivo cuando la concentración de nutrientes, especialmente de N y P, en lagos y ríos aumentan por encima de los niveles considerados como normales (Figs.1-a, 1-b). El aumento del contenido de nutrientes en el agua estimula el crecimiento de algas y hierbas acuáticas indeseables. Cuando éstas mueren, su descomposición resulta en deficiencias de oxígeno en el agua. Esto causa serios problemas para la industria piscícola, recreación, y fuentes de agua municipales. Asociado con este proceso está la cobertura periódica de la superficie de agua con *Cianobacteria* (alga verde-azul), lo cual ocurre en fuentes de agua potable y que puede representar un serio peligro a la salud de animales y humanos.

La eutroficación de los recursos hídricos se ha convertido en un problema mundial debido a que las actividades humanas contribuyen a aumentar la velocidad de recarga de las fuentes de agua con nutrientes. Los nutrientes que contaminan los recursos hídricos puede provenir de diferentes fuentes. Algunas de estas fuentes, tales como las descargas industriales o de plantas de tratamiento de efluentes urbanos, pueden ser fácilmente identificados y se denominan "fuentes puntuales" de contaminación. En contraste, la mayoría de las fuentes de contaminación de origen agrícola están más dispersas y son más difíciles de identificar. Estas son comúnmente denominadas "fuentes no puntuales o fuentes difusas".

En Los Estados Unidos, la eutroficación se convirtió en un problema serio en las décadas de 1960 y 1970, cuando se encontró que la calidad de las aguas de muchos cuerpos de agua importantes se estaban convirtiendo en inseguros para el consumo humano. Esto incluyó al Lago Erie, uno de los Grandes Lagos compartidos por Estados Unidos y Canadá. Mientras los nutrientes provenientes de la agricultura contribuyeron al problema, las fuentes más importantes fueron identificadas como fuentes puntuales que descargaban nutrientes, especialmente P, y que provenían de efluentes municipales e industriales. Una campaña muy fuerte de educación y regulación resultó en una reducción gradual de los nutrientes provenientes de estas fuentes. Se construyeron muchas nuevas plantas para tratar estos efluentes. Un paso importante fue el de requerir a los productores de detergente y jabón que reformularan sus productos, lo cual redujo considerablemente el contenido de P de los efluentes municipales (McGucken, 2001).

Aunque las fuentes puntuales aún contribuyen considerablemente a la contaminación de los recursos hídricos, las fuentes agrícolas no puntuales se han convertido en las fuentes más importantes. De igual modo, aunque la contaminación con nitrógeno sigue contribuyendo a la eutroficación y es la causa principal en muchos casos, el fósforo es con más frecuencia el elemento más limitante al proceso en los cuerpos de agua dulce de los Estados Unidos.

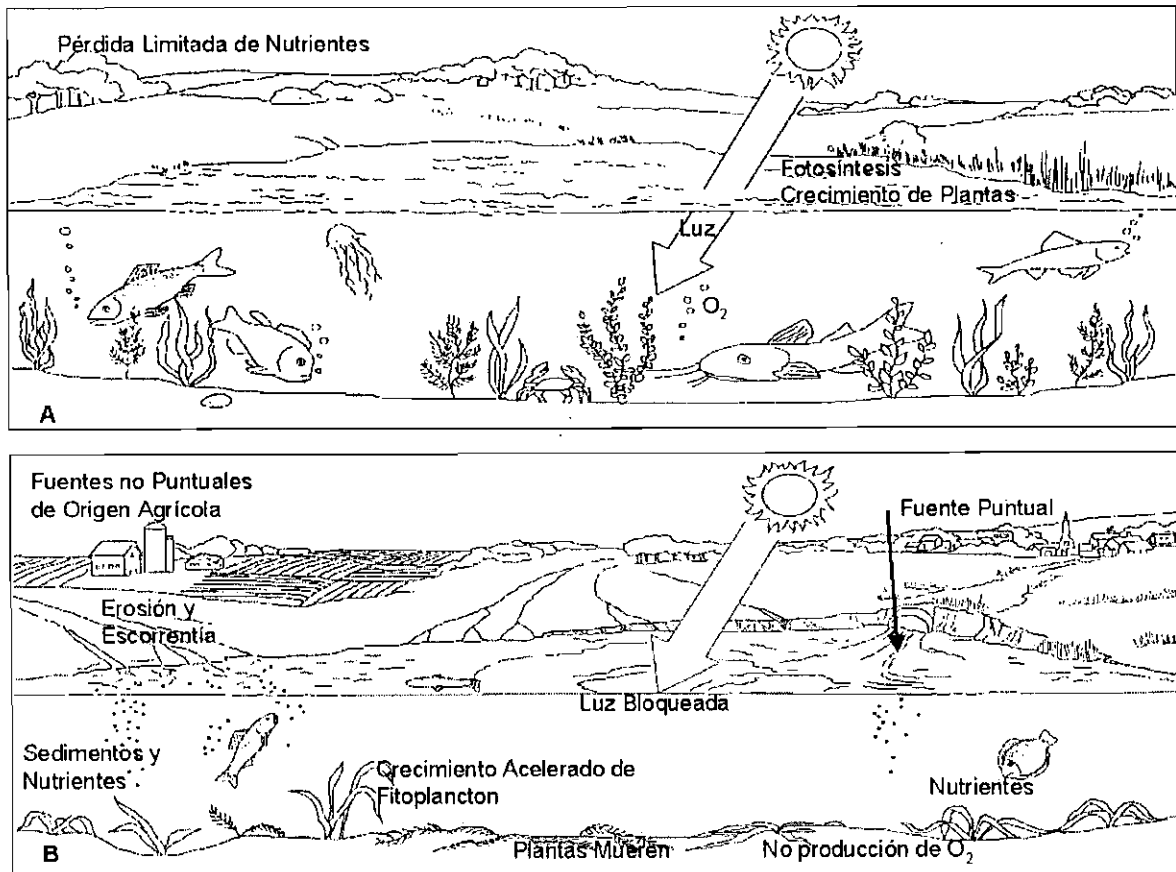


Figura Error! Unknown switch argument.: **A-** Proceso natural de eutoficación en el cual la disponibilidad de nutrientes es limitada; **B-** La eutroficación es acelerada por el influjo de nitrógeno y fósforo desde fuentes no puntuales de origen agrícola y desde fuentes puntuales de origen urbano.

El Movimiento del Fósforo Hacia los Recursos Hídricos

Casi todo el fósforo de origen agrícola que llega a los cuerpos de aguas superficiales es transportado por medio de la escorrentía superficial de las aguas resultantes del exceso de lluvia o riego. Excepto por unas cuantas situaciones especiales, la cantidad de fósforo que llega a las fuentes de agua subterránea es muy limitada. Alrededor del 60 al 90 por ciento del fósforo que sale de un predio está adherido a los sedimentos resultantes de la erosión de suelos, mientras que el resto es transportado disuelto en el agua de escorrentía (Fig. 2). El fósforo disuelto proviene de los primeros 2-5 cm de la superficie del suelo, donde la concentración de fósforo es normalmente más alta. En regiones áridas y semiáridas, el riego por surcos en tierras con mucha pendiente provee condiciones favorables para la pérdida de fósforo, donde la erosión y la escorrentía podrían de otro modo ser bastante limitadas.

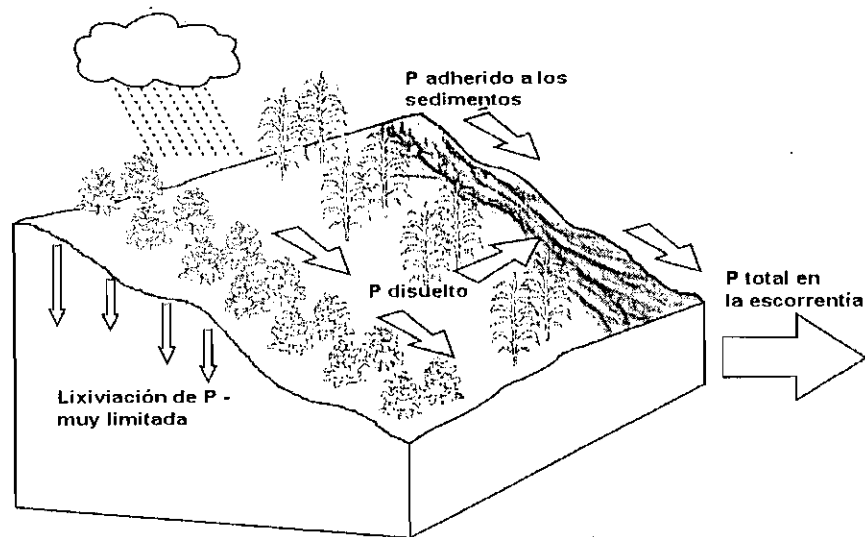


Figura 2: Mecanismos que ocasionan las pérdidas de fósforo desde fuentes no puntuales de origen agrícola.

Aceleración de la Eutroficación Debido a la Intensificación de la Producción

¿Por qué se ha convertido la eutroficación en tan grave problema? Parte de la respuesta claramente se puede atribuir al crecimiento de las zonas urbanas y al consecuente incremento en las descargas de P contenido en los efluentes urbanos. El aumento en la aplicación de fertilizantes fosfatados a los cultivos también ha contribuido al problema. Sin embargo, una porción importante de este aumento puede ser atribuido, directa o indirectamente, a la intensificación de la producción pecuaria. Hasta mediados del siglo XX, muchas de las grandes granjas ganaderas y avícolas en los Estados Unidos también producían gran parte de los granos que sus animales consumían. El estiércol era a su vez reciclado al ser aplicado a los cultivos como fertilizante. Hoy en día, las grandes granjas pecuarias no tienen suficiente capacidad para producir todo el grano que necesitan, e incluso algunas no producen nada de granos. Por tanto, muchos de los granos son importados de otros lugares, mientras que mucho del estiércol producido en tales granjas sigue siendo aplicado localmente como fertilizante.

Hasta hace poco, las recomendaciones para la aplicación de estiércol a los cultivos eran dirigidas a satisfacer los requerimientos de N, con tal de evitar la compra de fertilizantes químicos nitrogenados. Para suplir las necesidades de P de un cultivo como el maíz, sin acumular excesos en el suelo, la relación N:P en el estiércol debe estar alrededor de 7:1. Sin embargo, la relación real es aproximadamente 4:1 en el estiércol de ganado de carne y de leche y podría ser tan baja como de 3:1 a 2:1 en el estiércol de origen avícola. Cuando se aplica suficiente estiércol para

satisfacer las necesidades de N del cultivo, el P en exceso se acumula en los primeros centímetros de la superficie del suelo, aumentando considerablemente el potencial de que éste se pierda con el agua de escorrentía. Por ejemplo, suponiendo que suficiente estiércol de pollo es aplicado a un cultivo de maíz para suplir 225 Kg-N/ha. Después de tomar en cuenta el P contenido en el grano que es removido del campo, el estiércol aplicado resultará en una adición neta al suelo de unos 100 Kg-P/ha. Dado que el fósforo es relativamente inmóvil en el suelo, aplicaciones anuales de estiércol de esta magnitud, en sólo unos 3-5 años resultarían en un considerable aumento en el contenido de P de la capa superficial del suelo y en un aumento sustancial en el potencial de pérdidas.

Controlando la Pérdida de P de Origen Agrícola

La manera más efectiva de controlar los aportes de P de origen agrícola que resultan en problemas de eutroficación es a través de la ejecución de un plan de manejo a nivel de cuenca. Este método ha sido exitoso en varias zonas con problemas de eutroficación en los Estados Unidos (Sharpley, et al., 1999). El plan debe incluir tanto el control de las fuentes de P como el control del mecanismo de transporte de P desde el suelo hasta los recursos hídricos. No es viable aplicar el plan de manejo en toda el área de la cuenca. La mayoría del P proviene de una pequeña porción de la cuenca, y como resultado de unos cuantos eventos de escorrentía. Una fuente alta en P con poca oportunidad de ser transportada podría no constituir un peligro ambiental. Si existe un alto potencial de transporte pero una fuente limitada de P a ser transportada, el peligro es mínimo. El manejo debe enfocarse a las "áreas críticas" en donde esas dos condiciones coexisten.

El control de las fuentes de P se consigue desarrollando un balance entre las entradas y las salidas de P en la cuenca, y manejando cuidadosamente el nivel de P en el suelo. Las entradas están compuestas por el alimento balanceado y los fertilizantes, mientras que las salidas son en forma de cultivos y productos animales. Es de vital importancia limitar la cantidad de P aplicada al suelo, ya sea en forma de fertilizantes químicos o como estiércol. El análisis de suelo y del estiércol para conocer su contenido de P, antes de ser aplicado como estiércol o fertilizante, provee la información necesaria para tomar decisiones inteligentes acerca de los requerimientos de P y las cantidades que deben ser aplicadas. Investigaciones recientes ofrecen nuevas maneras de mejorar el control de las fuentes de P. Por ejemplo, si sincronizamos mejor el contenido de P en la dieta de los animales con sus requerimientos nutricionales, el contenido de P en el estiércol podría ser reducido en un 15-17% (Sharpley, et al., 1999). Fitomejoradores están desarrollando variedades de maíz que hacen el P en el grano más digerible, permitiendo esto reducir aún más el contenido de P en el alimento balanceado, lo cual a su vez reduce la cantidad de P excretada en el estiércol.

El control del mecanismo de transporte de P requiere de la reducción de la erosión y de la escorrentía. Cuando se reduce la erosión, el transporte del P adherido a los sedimentos también se reduce. Sin embargo, a menos que el volumen de agua que escurre del campo sea también reducida, la cantidad de P que es arrastrado en solución podría cambiar muy poco y habría muy poco o ningún efecto en la eutroficación. Para controlar la escorrentía es necesario aumentar la

porción del agua de lluvia que se infiltra en el lugar donde cae. Incluyendo prácticas como la labranza mínima o cero labranza, manejo de residuos de cultivos, franjas de amortiguamiento, terrazas, labranza en contorno, cultivos de cobertura, y lagunas de sedimentación, pueden servir para reducir tanto las pérdidas de P por erosión como por escorrentía.

Probablemente el factor más importante para el control de las pérdidas de P y de la consecuente eutroficación es la cooperación entre los administradores de los recursos hídricos, residentes urbanos y productores agrícolas. Hay varios ejemplos notables en los Estados Unidos y en otras partes del mundo que muestran que es realmente posible que estos grupos se pongan de acuerdo para desarrollar un plan de manejo y luego hacer que el plan funcione por un largo tiempo, revirtiendo así tendencias de largo plazo de incremento de la contaminación.

Eutroficación en Regiones de Suelos Tropicales y Volcánicos

Los suelos tropicales, tales como los suelos ácidos y con alto contenido de aluminio de El Cerrado de Brasil o de la región de Los Llanos de Colombia y Venezuela, tienden a fijar P en forma de fosfatos de hierro y aluminio. La fijación del P también ocurre en suelos de origen volcánico como los del área de Los Andes, ya que en estos suelos el P está fuertemente adsorbido a las partículas de arcilla. En consecuencia, cuando el agua escurre sobre la superficie de estos suelos, sólo una pequeña porción del P se disuelve en el agua. Cuando estos suelos se erosionan, el P que está adherido a los sedimentos es transportado como se describió anteriormente. Sin embargo, después de que las partículas son depositadas, la mayoría del P permanece fuertemente ligado a las partículas del suelo. Sólo una cantidad muy limitada del P se disolverá en el agua, lo cual reduce el potencial de que problemas de eutroficación sean inducidos por el exceso de P.

Esto no significa que la eutroficación no puede ser un problema en zonas donde predominan los tipos de suelo descrito anteriormente. Hay numerosos informes acerca de la eutroficación de lagos de agua dulce ocurrida en países de América del Sur, incluyendo regiones que tienen áreas significativas con suelos tropicales y volcánicos. Algunos de estos problemas son el resultado de emisiones de N y P provenientes de fuentes puntuales de origen industrial y municipal. Otros, indudablemente son total o parcialmente causados por fuentes no puntuales de origen agrícola. Sin embargo, en regiones dominadas por suelos que retienen el P muy fuertemente, parece menos probable que el P proveniente de la agricultura sea la causa principal de la eutroficación.

Contaminación de los Recursos Hídricos con Nitrato

Contaminación en Regiones Agrícolas

El Problema

El nitrógeno en forma de nitrato es probablemente el nutriente contaminante mas comúnmente encontrado en concentraciones excesivas en fuentes de aguas públicas y privadas. El nitrato entra tanto en las fuentes de aguas superficiales como en las subterráneas, proveniente de fuentes puntuales urbanas e industriales, y de fuentes no puntuales de origen agrícola. En los Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental ha establecido que la concentración de N-NO_3 en

fuentes de aguas potables públicas no debe exceder 10 mg/L. Cuando esta concentración es excedida, las municipalidades deben instalar y operar equipos caros en sus plantas de tratamiento de agua potable para bajar la concentración, o deben buscar otras fuentes de agua no contaminadas.

Las regiones de producción agrícola intensiva son especialmente susceptibles a problemas de contaminación con nitrato. Por ejemplo, en los últimos 25 años, serios problemas de contaminación con nitrato se han desarrollado en las aguas superficiales y subterráneas de la región norcentral de los

Estados Unidos, conocida como el “Cinturón del Maíz” (Fig. 3). Debido al desarrollo extensivo del riego durante los últimos 40 años, el área se ha extendido hacia el Oeste hasta la región semi-árida de la Pradera Norteamericana (the Great Plains). Esta región produce 83% del maíz y consume cerca del 53% de todo el fertilizante nitrogenado usado en los Estados Unidos.

A pesar de que se han tomado algunas medidas para mejorar el manejo agrícola, el nitrato proveniente tanto de la agricultura de secano como bajo riego continúa siendo un problema en esta región.



Figura 3: El área sombreada muestra la localización de la principal área productora de maíz o “*Cinturón Maicero*” de los Estados Unidos.

Efectos Sobre la Salud Humana

Existen varias preocupaciones de salud relacionadas con el consumo de agua con un alto contenido de nitrato. Metahemoglobinemia, también conocida como *Asíndrome del bebé azul*, la cual afecta a niños menores de seis meses es la única enfermedad claramente causada por el consumo de agua con alto contenido de nitrato. Mujeres embarazadas y otros adultos con ciertas condiciones de salud podrían también enfrentar riesgos adicionales a la salud. El límite de 10 mg/L de N-NO_3 fue establecido para prevenir la ocurrencia de metahemoglobinemia en infantes, lo cual provee un margen de seguridad razonable.

La comunidad médica ha reportado otros efectos adversos a la salud asociados con el consumo por largo tiempo de agua contaminada con nitrato. Estos incluyen la hipertensión, metahemoglobinemia clínica en niños mayores, aumento en la mortandad infantil, y defectos del

sistema nervioso central en recién nacidos. Hay también resultados de investigaciones que sugieren que el alto contenido de nitrato en el agua potable podría aumentar el riesgo de cáncer del estómago, del esófago y de la vejiga. Un estudio reciente realizado por epidemiólogos en Nebraska indicó que la exposición prolongada a altos niveles de nitrato en el agua potable podría contribuir a aumentar el riesgo de un tipo de cáncer conocido como *Linfoma no Hodgkin* (Ward et al., 1996). ***Sin embargo, dentro de la comunidad médica, no hay un acuerdo general con respecto a la confirmación de estos efectos.*** Una gran dificultad en este tipo de estudios es que es casi imposible documentar con certeza la cantidad y concentración de agua contaminada con nitrato que un individuo ha consumido durante varios años.

Movimiento de Nitrato hacia las Fuentes de Agua

La mayoría de la contaminación con nitrato de origen agrícola proviene de campos a los cuales se le debe aplicar nitrógeno con el propósito de aumentar la producción de los cultivos. Si un exceso de lluvia o riego ocurre poco después de aplicar el N, parte de éste podría perderse por escorrentía, especialmente si la fuente de N no fue incorporada al suelo. Formas no solubles de N podrían también estar adheridas a los sedimentos arrastrados por la erosión. En algunos casos, estas fuentes de N pueden ser muy importantes en la contaminación de aguas superficiales. Por ejemplo, cuando se aplica estiércol a la superficie del suelo, éste puede ser arrastrado hacia las fuentes de aguas superficiales antes de que pueda ser incorporado al suelo. Sin embargo, la cantidad de N que entra a los recursos hídricos por medio de la escorrentía es relativamente limitada, en comparación con las pérdidas de nitrato por lixiviación.

Cuando fertilizantes nitrogenados, estiércol, u otras fuentes de nitrógeno son aplicadas al suelo, los microorganismos del suelo gradualmente convierten las varias formas de N a nitrato, el cual es altamente soluble en agua. La mayoría de las pérdidas de N ocurren cuando el nitrato disuelto en la solución del suelo es transportado a través y por debajo de la zona radicular, donde éste eventualmente llega al agua subterránea (Fig. 4-a). A medida que el agua subterránea contaminada escurre hacia las aguas superficiales, éstas también se contaminan. El tiempo que toma para que el nitrato viaje desde la zona radicular, a través del agua subterránea, y llegue a las aguas superficiales es muy variable, dependiendo del suelo y de las condiciones geológicas. En zonas donde se usan drenajes subterráneos para controlar niveles freáticos pocos profundos, estas aguas contaminadas entran en los drenajes que luego descargan directamente en aguas superficiales.

En estos casos el tiempo que dura el nitrato en llegar desde la zona radicular hasta las aguas superficiales puede ser sólo de unas cuantas horas o unos cuantos días (Fig. 4-b). En regiones donde los niveles freáticos son tan profundos que no se requiere de drenajes artificiales, el nitrato que se lixivia de la zona radicular puede que se acumule paulatinamente en el agua subterránea. Si el agua subterránea es usada como fuente de agua potable, los consumidores tendrán que enfrentarse a un problema de contaminación que se originó muchos años atrás.

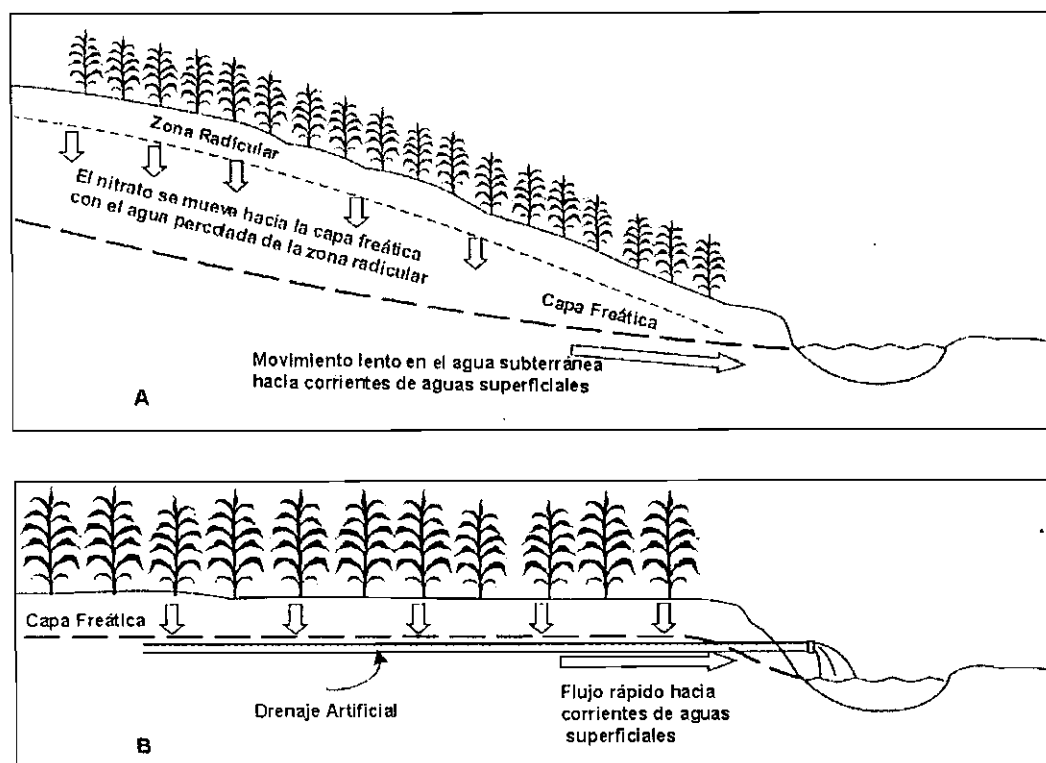


Figura 4: A-Bajo condiciones de drenaje natural, el movimiento del nitrato hacia las corrientes de aguas superficiales podría requerir meses o años. B-El drenaje artificial acelera el movimiento de nitrato desde el predio hasta las corrientes de aguas superficiales.

El Manejo Agrícola Afecta las Pérdidas de Nitrógeno

Hay muchos factores que afectan tanto la disponibilidad como el consumo de N por un cultivo en crecimiento. Por ejemplo, parte del N disponible para el cultivo es el resultado de la mineralización del N orgánico presente en el suelo antes y durante la estación de crecimiento. Este proceso biológico es afectado por muchas variables físicas y químicas que ocurren en el medio ambiente del suelo. Antes de la siembra es imposible predecir con certeza cuánto N será mineralizado durante el ciclo del cultivo. En consecuencia, también se desconoce la cantidad mínima de fertilizante nitrogenado que se necesita para optimizar la producción.

A pesar de esto, muchos agricultores del "Cinturón Maicero" de los Estados Unidos continúan aplicando todo el N antes de la siembra, porque se les hace más fácil y porque en esta época disponen de mayor tiempo para realizar esta labor. Lo típico es que los agricultores estimen los requerimientos de fertilizantes nitrogenados basándose en el rendimiento promedio de los últimos

cinco años. Muchos agregan un 5-15% más N como una forma de un "seguro de N" para aumentar los rendimientos en caso de que la mineralización esté por debajo del promedio o que las condiciones de crecimiento resulten más favorables que de costumbre. Sin embargo, si las condiciones resultan ser sólo promedio (o peores), el N adicional no es absorbido por el cultivo y podría lixiviarse de la zona radicular debido a la lluvia o el riego durante la estación de crecimiento, o debido a precipitaciones que ocurran antes de sembrar la próxima cosecha.

Es casi imposible evitar que parte del nitrato se pierda por lixiviación cuando se está produciendo maíz u otro cultivo que requiera mucho N, especialmente si el cultivo es fertilizado con miras a obtener rendimientos económicamente óptimos. Cuando se aplican las cantidades de N recomendadas actualmente antes de la siembra en monocultivo de maíz en el Cinturón Maicero de los Estados Unidos, se producen pérdidas por lixiviación que promedian 35-55 kg-N/ha. En años cuando las precipitaciones están por encima de lo normal, las pérdidas serán mayores y podrían ser insignificantes, prácticamente cero, en años cuando la precipitación es deficiente (Randall and Iragavarapu, 1995). Las pérdidas de N podrían ser menores en zonas húmedas cuando el monocultivo de maíz se cambia por un sistema de rotación de cultivos de maíz-soya (Kanwar, et al., 1997), pero en zonas semiáridas las pérdidas podrían ser similares o mayores (Klocke, et al., 1999). Cuando aplicaciones excesivas de fertilizantes nitrogenados o de otras fuentes de N provocan que el N disponible en el suelo sea superior a los requerimientos del cultivo, en cualquiera de estos dos ambientes las pérdidas pueden ser considerablemente superiores a los valores indicados previamente. A pesar de que las pérdidas de nitrato no pueden ser reducidas a cero, estas pueden ser reducidas mediante el buen manejo y por medio de la aplicación extensiva de las tecnologías actualmente disponibles. Nuevas tecnologías que están siendo actualmente probadas en el campo podrían reducir aún más las emisiones de nitrato al medio ambiente.

Movimiento del Nitrato en Suelos de Origen Volcánico

Los suelos derivados de depósitos de materiales volcánicos tienden a ser muy variables en cuanto a su composición. Algunos funcionan como un complejo catiónico en vez de como un complejo aniónico, como es el caso de la mayoría de los suelos agrícolas. Como tal, algunos suelos volcánicos son capaces de atraer los aniones de nitrato y fosfato a sus partículas de arcilla cargadas positivamente. Es muy difícil realizar un análisis de suelo muy preciso en estos suelos debido a la naturaleza altamente heterogénea de los minerales que los componen. La lixiviación de nitratos en algunos suelos volcánicos es normalmente limitada. Sin embargo, en estos suelos los cationes de amonio están sujetos a lixiviación. Esto puede ocasionar gran variabilidad de un punto a otro en la concentración de nitrato en el agua subterránea de áreas en donde las condiciones conducirían de otro modo a niveles significativos de contaminación. Esto sin embargo no significa que no existen problemas de contaminación de aguas subterráneas con nitrato en áreas con suelos de origen volcánico. Por ejemplo, estudios del acuífero Santiago muestran problemas muy serios de contaminación resultantes del riego con aguas negras, y de la recarga con aguas negras sin tratar y con efluentes industriales (Grilli et al., 2000).

Contaminación de Estuarios y Ecosistemas Marinos Costeros

El Problema Global

En las últimas tres décadas se ha hecho evidente que las cantidades crecientes de nutrientes que entran a las aguas dulces del planeta podrían crear graves problemas de eutroficación en estuarios y ecosistemas marinos costeros. Cuando el contenido de oxígeno del agua de mar es inferior a 2-3 mg/L, las aguas son denominadas como hipóxicas (excentas de oxígeno). Aunque hay unas cuantas zonas hipóxicas naturales en los océanos mundiales, la mayoría son el resultado de actividades humanas. Un influjo de nutrientes, particularmente N y P, promueven la producción de excesos de fitoplancton, zooplancton, y otros de los llamados vida marina primaria. La materia orgánica producida como resultado de esto precipita hasta el fondo del mar y se descompone, consumiendo más oxígeno del que puede ser suplido por la mezcla vertical que ocurre naturalmente entre el agua alta en oxígeno que se encuentra en la superficie, con el agua de profundidades mayores.

El impacto de esto en la producción de peces y de otros tipos de vida marina puede ser severo. Los peces emigran de las aguas afectadas, si les es posible, mientras que otros peces que habitan en el fondo del mar y otras vidas marinas menos móviles, tales como camarones y cangrejos, podrían perecer. Muchas áreas de aguas hipóxicas han sido documentadas en aguas costeras del hemisferio norte (Fig. 5). La mayoría de éstas han aparecido en los últimos 50 años y muchas, en



Figura 5: Localización de importantes zonas hipóxicas que han sido identificadas alrededor del mundo (CAST, 1999).

los últimos 20 años, a medida que las actividades de la creciente población humana han aumentado la cantidad de nutrientes que los principales ríos transportan hacia los mares. En Los Estados Unidos, existen bahías en las áreas costeras del Sur y del Este que se consideran moderada o severamente contaminadas. Se cree que la causa principal es la contaminación con N de fuentes no puntuales de origen agrícola. La Figura 5 muestra un número muy limitado de

áreas costeras contaminadas en América del Sur. Esto podría deberse en cierto grado a la carencia de datos en vez de a la ausencia de contaminación. Ciertamente existe el potencial de que aumente la seriedad de este problema a medida que las poblaciones humanas continúan expandiéndose en las zonas costeras.

Contaminación con Nitrato en el Golfo de México

Las pérdidas de nitrato proveniente de la agricultura no sólo contamina las fuentes de agua localizadas en las zonas de producción agrícola, sino que tales pérdidas podrían también afectar recursos hídricos situados a miles de kilómetros de distancia. En los Estados Unidos, la creciente exportación de nitrato hacia el Golfo de México, proveniente tanto de fuentes agrícolas como urbanas, ha resultado en el desarrollo de grandes zonas hipóxicas en las cercanías de la desembocadura del río Misisipí. Esta es la zona hipóxica más grande causada por el hombre en el hemisferio occidental. La causa principal de esto es el incremento en la cantidad de N acarreada por el río en las últimas tres décadas. El Misisipí es el sistema fluvial más grande de los Estados Unidos, drenando cerca del 41% de los 48 Estados continentales, incluyendo prácticamente toda el área del "*Cinturón Maicero*" de los Estados Unidos. Se estima que los fertilizantes agrícolas contribuyen cerca del 55% de la carga total de N del río (Fig. 6). La mayoría del fertilizante nitrogenado proviene de las 325 millones de hectáreas de tierras agrícolas que componen el "*Cinturón Maicero*".

El problema de la hipoxia en el Golfo de México ha sido detallado en un excelente informe del Consejo para la Ciencia Agrícola y la Tecnología de los Estados Unidos (CAST, 1999). El problema fue detectado por primera vez a principios de la década de 1970 y se extendió más en la década de 1990. Las aguas hipóxicas pueden incluir de 20 a 80% del perfil del agua entre 5 y 30 metros de profundidad. El área total afectada varía de año a año, promediando alrededor de 14,000 km² durante el período de 1990 a 1998 y alcanzando su máxima cerca de 18,000 km² durante la gran inundación de 1993. La expansión de las zonas hipóxicas ha impactado seriamente la industria pesquera. Esto es debido a que la disminución de las fuentes primarias de alimentos ha reducido la abundancia de peces y camarones, resultando en una reducción en el volumen y la eficiencia de la pesca. A medida que el problema de la hipoxia en el Golfo de México se haga

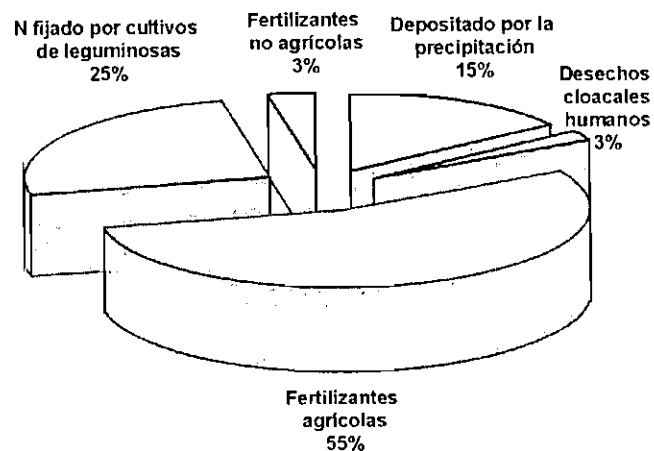


Figura 6: Origen del nitrato presente en las aguas descargadas por el Río Misisipí en el Golfo de México.

más evidente, de igual modo aumentarán las presiones políticas y sociales para que los agricultores del "*Cinturón Maicero*" hagan mayores esfuerzos para controlar las pérdidas de nitrato de sus campos.

Reduciendo las Pérdidas de Nitrato de Origen Agrícola

Tecnologías Disponibles Actualmente

La contaminación con nitrato proveniente de la agricultura es un problema muy difícil de solucionar. Sin embargo, la aplicación de manera extensiva de las tecnologías actualmente disponibles para el manejo de agua y N podría reducir significativamente la contaminación de los recursos hídricos con nitrato. En las condiciones de los Estados Unidos, un buen plan de manejo debe incluir cuatro elementos claves:

1. Aplicar sólo las cantidades de N necesarias para satisfacer las necesidades del cultivo y calcular los requerimientos de N tomando en cuenta todas las fuentes de N del suelo.
 - Analizar el contenido de N residual en el suelo antes de estimar los requerimientos de N.
 - Si se va a aplicar estiércol como fuente de N, analizarlo antes de aplicarlo para determinar su contenido de nutrientes, incluyendo N y P.
 - Calcular los requerimientos de N en base al establecimiento de un rendimiento meta realista. La estimación de potenciales de rendimientos demasiado optimistas resulta en aplicaciones excesivas de N.
2. La mayoría del N debe ser aplicado cerca o durante la época de rápida absorción de N por parte del cultivo.
 - Menos de la mitad del N que el cultivo requiere debe ser aplicado antes de la siembra. El resto debe ser aplicado al momento en que el cultivo más lo requiera. Esto reduce el potencial de pérdidas por lixiviación, en comparación con la aplicación de todo el N antes de la siembra. De este modo, menos N es requerido para obtener el mismo rendimiento.
 - Si es necesario aplicar N antes de la siembra, la aplicación de inhibidores de la nitrificación junto con el fertilizante ayuda a disminuir la velocidad de conversión del N amoniacal, el cual es inmóvil en el suelo, a nitrato, que es muy móvil. Esto reduce el potencial de pérdida de N al principio de la estación de crecimiento del cultivo. El cultivo es capaz de usar de igual manera ambas formas de N.
 - Productores con sistemas de riego por aspersión o por goteo tienen la opción de aplicar pequeñas porciones de N a través del agua de riego (fertirrigación), supliendo de este modo el N en la cantidad y en la época que el cultivo lo requiere.

3. Minimizar el N residual que permanece en el suelo al final de la cosecha.

- Cultivos de cobertura que se siembran después de la cosecha pueden absorber N residual que de otro modo podría ser lixiviado por la lluvia durante el período entre una cosecha y otra. De esta forma el N es almacenado de manera temporal en el cultivo de cobertura y es luego liberado al suelo durante la próxima estación de crecimiento. Esta práctica resulta mejor en condiciones de climas húmedos, o cuando se usa riego por aspersión en climas áridos o semiáridos.

4. Manejar cuidadosamente el agua en el predio.

- En la producción bajo riego, las aplicaciones de agua deben realizarse de acuerdo a las necesidades del cultivo, en vez de aplicar el riego de acuerdo al calendario. Esto requiere del chequeo periódico del nivel de humedad del suelo en el predio y de la aplicación de las técnicas estándares de programación de riego, con las cuales se puede saber no sólo cuándo regar sino también cuánta agua aplicar.
- La medición de la cantidad de agua de riego aplicada es esencial para mejorar el manejo del riego. Sin esto, el productor no podrá saber si los cambios introducidos en el manejo del agua han resultado en aumentos en la eficiencia de riego.
- En riego por superficie, la buena nivelación del terreno ayuda a mejorar la uniformidad del riego, reduciendo así la excesiva infiltración de agua y la consecuente lixiviación de nutrientes.

Nuevas Tecnologías

Los avances recientes en la investigación han mejorado considerablemente las tecnologías de manejo del N en el predio. Se están desarrollando técnicas y equipos que permiten al productor medir el nivel de N del cultivo, en diferentes épocas durante su desarrollo, y poder aplicar N sólo si se necesita. En unos cuantos años, la realización de múltiples aplicaciones de N será la práctica estándar, en vez de la excepción. Tecnologías están siendo desarrolladas tanto para agricultura de secano como para agricultura bajo riego. Por ejemplo, se están desarrollando sistemas de riego de pivote central que serán capaces de aplicar dosis variables de N mediante fertirrigación, para ajustar mejor las aplicaciones de N a las variaciones de los requerimientos del cultivo que generalmente existen en un predio. Para la agricultura de secano se están desarrollando equipos que permitirán al productor aplicar N en épocas cuando normalmente el cultivo está suficientemente alto como para que el equipo normal pueda entrar al campo sin dañar el cultivo.

La adición de sistemas de posicionamiento global (GPS) y de monitores de rendimiento en las máquinas cosechadoras ha permitido a los productores desarrollar mapas de rendimientos que indican los lugares del predio donde los potenciales de rendimientos son más altos o más bajos. Esta información puede usarse conjuntamente con equipos de aplicación de dosis variables de fertilizante, guiados por GPS, para cambiar la dosis de aplicación a medida que el equipo se mueve a través del campo. De esta manera la aplicación de fertilizante podrá ajustarse a las

necesidades del suelo y del cultivo, en vez de aplicar una dosis uniforme en todo el campo, como es la práctica generalizada actualmente. Esto reducirá las aplicaciones excesivas de N en partes del campo en donde el cultivo es incapaz de usarlo eficientemente.

También se están desarrollando técnicas para desnitrificar las descargas de drenajes subsuperficiales en regiones húmedas. Cuando las aguas de drenaje descargan en pantanos, en vez de directamente en ríos y arroyos, la desnitrificación que ocurre en los pantanos puede remover cantidades significativas de nitrato. Estudios realizados en regiones húmedas han indicado que 1 ha de pantano por cada 100 ha de tierra cultivada podría ser suficiente bajo ciertas condiciones. Sin embargo, aún existe el cuestionamiento de si esta área es adecuada durante la parte temprana de la época de crecimiento del cultivo cuando las temperaturas son más bajas, la actividad biológica es más lenta y los caudales de drenaje son mayores. Investigadores continúan tratando de desarrollar técnicas para controlar el tiempo de residencia en el pantano para incrementar la desnitrificación. Nosotros anticipamos que el desarrollo de estas y otras nuevas tecnologías continuará a medida que aumentan las presiones sociales y políticas para limitar las pérdidas de nitrato de origen agrícola.

Solucionando el problema de contaminación con nitrato en el Golfo de México

El disminuir la carga de nitrato en las aguas del río Misisipí es un enorme desafío. Alguna reducción de las pérdidas de N provenientes de las áreas agrícolas podría lograrse usando las tecnologías disponibles actualmente, las cuales fueron descritas en la sección anterior de este documento, siempre que éstas sean aplicadas en la mayor parte del "*Cinturón Maicero*". La aplicación de algunas de estas tecnologías implican un costo adicional para el productor, pero en general el costo no es muy alto. Las tecnologías que están en proceso de desarrollo disminuirán aún más la lixiviación de nitrato. Algunas de estas tecnologías le ahorrarán dinero al productor tan pronto como sean aplicadas, pero otras les costarán sumas importantes de dinero. Cambios más drásticos tales como la reducción de más del 20% en las cantidades de fertilizantes nitrogenados recomendadas actualmente para lograr una producción óptima, o un cambio a otros cultivos que requieran menos N producirán un gran impacto en la rentabilidad de la agricultura.

La gran mayoría de los productores pueden ser convencidos de alterar sus prácticas cuando se les comprueba que tales cambios aumentaran sus beneficios, con poco o ningún aumento en el riesgo económico. Algunos también están dispuestos a modificar sus prácticas puramente por beneficios ambientales, cuando tales cambios no afectan sus beneficios económicos o tienen un costo limitado. Sin embargo, muy pocos están dispuestos a realizar cambios que les sean costosos y que no les pvean ningún beneficio personal. Se deben tomar decisiones políticas acerca de qué tanta presión puede o debe ser aplicada para forzar cambios en las prácticas de manejo.

Conclusiones

La contaminación de recursos hídricos con nutrientes, particularmente N y P, resultantes de fuentes no puntuales de origen agrícola es un problema importante a nivel mundial. Es muy probable que este problema aumente en las próximas décadas a medida que la agricultura se vuelve más intensiva con miras a satisfacer las necesidades de alimentos de la creciente población. Los resultados obtenidos en varios países muestran que la aplicación cuidadosa de tecnologías que existen actualmente en un área extensa puede ayudar a reducir los niveles de pérdidas de nutrientes de tierras agrícolas. Esto requiere de organización cuidadosa y de esfuerzo consistente durante un largo tiempo para convencer a los agricultores de que realicen los cambios necesarios en sus prácticas de producción. Esto ha sido más exitoso en áreas en donde la mayoría de la gente está consciente de los problemas y están dispuestas a apoyar un programa tendiente a mejorar la calidad del agua. En tales casos, los incentivos económicos junto a la aplicación de regulaciones sobre las prácticas de producción agrícola han tenido éxito en mejorar la calidad tanto de recursos de aguas dulces como de aguas marinas. Sin embargo, parece cada vez más obvio que se requerirá de mejoras adicionales en las tecnologías y de su aplicación de manera extensiva, al igual que de la aplicación de restricciones en el uso y manejo de nutrientes para poder solucionar algunos de los problemas más difíciles. La aplicación a gran escala de grandes cambios en las prácticas de producción agrícola dependerá del logro de un consenso general en favor de hacer lo que sea necesario para proteger los recursos hídricos de la contaminación. Esto a su vez proveerá el incentivo para que el gobierno realice los cambios necesarios tanto en la política pública como en la legislación.

Referencias

- CAST. 1999. Gulf of Mexico hypoxia: land and sea interactions. Council for Agricultural Science and Technology Task force report no. 134.
- Grilli, A., T. Corrado, E. Aguirre and P. Moya. 2000. Cuidado con el nitrato. *Vertiente*. Año 5, No. 5. pp. 26-29.
- Kanwar, R.S., T. S. Colvin and D. L. Karlen. 1997. Ridge, moldboard, chisel and no-till effects on tile water quality beneath two cropping systems. *J. Prod. Agric.* 10:227-234.
- Klocke, N. L., D. G. Watts, J. P. Schneekloth, D.R. Davison, R. W. Todd, and A. M Parkhurst. 1999. Nitrate leaching in irrigated corn and soybean in a semi-arid climate. *Transactions of the ASAE* 42(6):1621-1630
- McGucken, W. Lake Erie rehabilitated: The occurrence and control of cultural eutrophication, 1960s-1990s. IWhA Conference. August 10-12, 2001. Bergen, Norway.
- Ongley, E.D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio

- FAO Riego y Drenaje – 55. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia.
- Randall, G. W. and T. K. Iragavarapu. 1995. Impact of long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. *J. Environ. Qual.* 24:360-366.
- Sharpley, A.N., T. Daniel, T. Sims, J. Lemunyon, R. Stevens, and R. Parry. 1999. Agricultural phosphorus and Eutrophication. ARS-149; Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.
- Ward, M. H., S. D. Mark, K. P. Cantor, D. D. Weisenburger, A. Correa-Villasenor, and S. H. Zahm. 1996. Drinking water nitrate and the risk of non-Hodkin's lymphoma. *Epidemiology.* 7:465-471.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
Facultad de Ingeniería Agrícola
Departamento de Recursos Hídricos



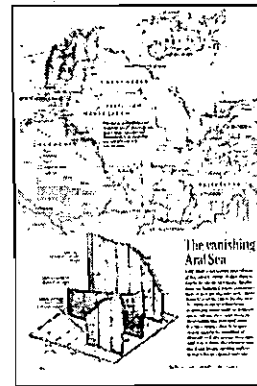
Riego y Contaminación

José Luis Arumí R.
Ingeniero Civil Ph. D.

¿Puede el riego causar daños ambientales?

SI

Mar Aral
El peor desastre ambiental
causado por el riego



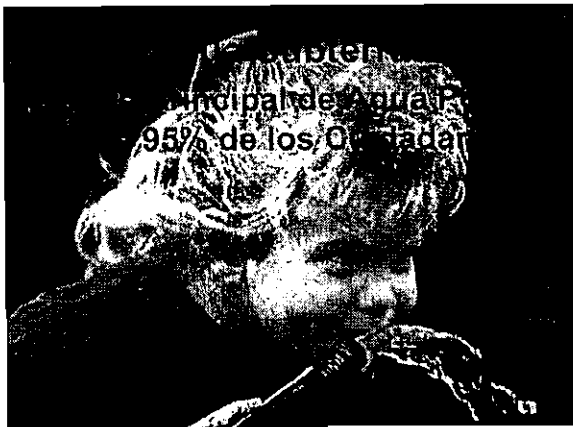
El Cinturón Maicero
de los Estados Unidos

North Dakota

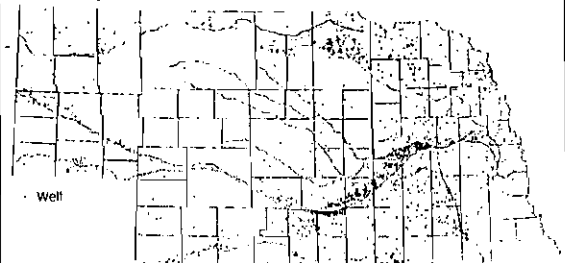
Hay un problema creciente
de contaminación por nitrato
que afecta aguas superficiales
y aguas subterráneas

2.400.000 ha de
Maíz irrigado

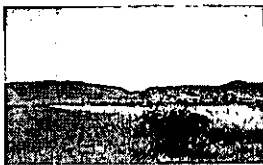
Wanda Buitrago Pozas del riego



**1/3 de los Pozos Tienen una
Concentración de N-NO_3
Superior al Límite de 10 mg/L**



¿Que pasa en nuestra
realidad?



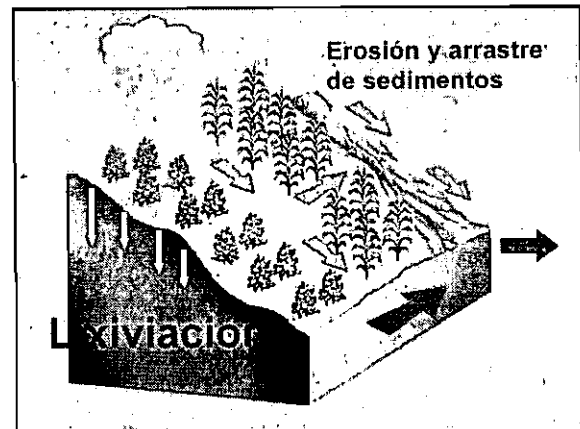
No estamos aislados del
entorno, nos guste o no
estamos insertos en un
sistema hidrológico

¿Que implica esto?

- Toda la contaminación que nosotros produzcamos afecta a aquellos ubicados aguas abajo
- Pero, a nosotros nos afecta la contaminación producida aguas arriba

Fuente:
www.dga.cl

Procesos de contaminación asociados al riego



Posibles impactos

- Contaminación de aguas subterráneas
- Sedimentación
- Agua de riego de mala calidad
- Crecimiento de algas en canales
- Eutroficación

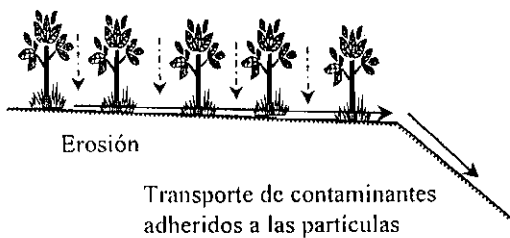
Mecanismos de transporte

Lixiviación

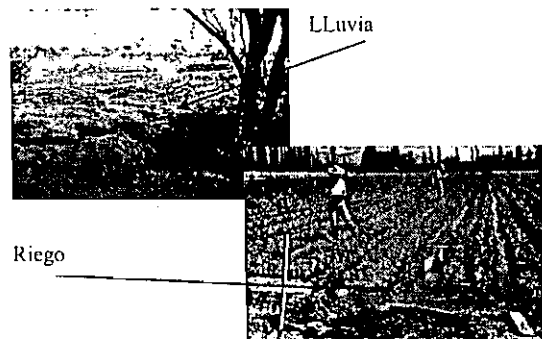


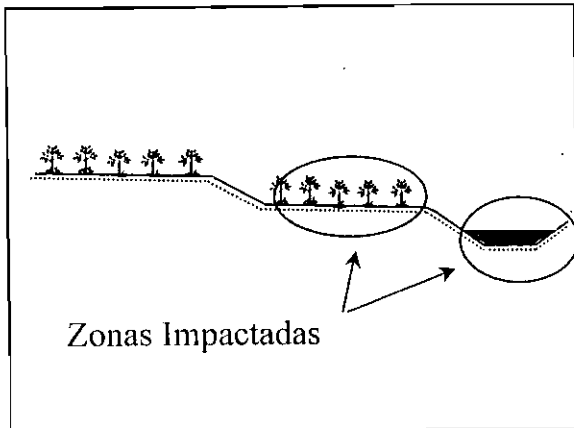
Mecanismos de transporte

Lavado del suelo



"Lavado" del suelo

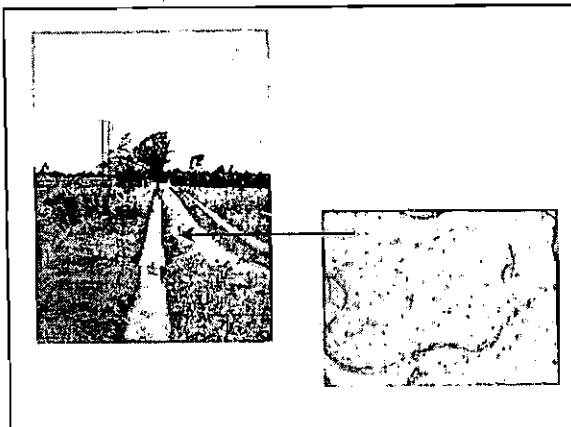
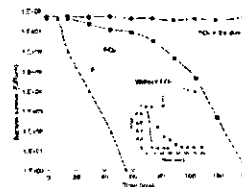
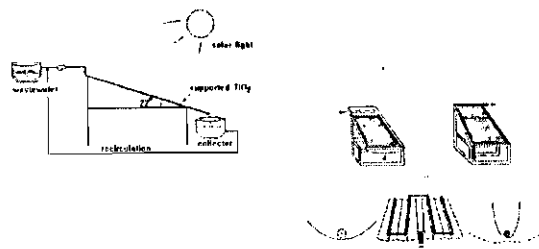




¿Como podemos proteger y protegernos?

- Buenas prácticas de manejo
 - Prevención
 - Control
 - Mitigación

Desinfección mediante fotocatalisis



Gracias



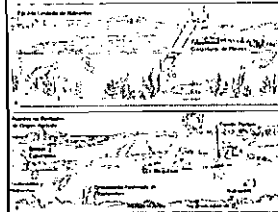
Presencia de algas en canales



Calidad del agua de riego



Eutroficación



Sedimentación



IMPACTO DEL MAL DRENAJE EN LA PRODUCTIVIDAD Y PRODUCCIÓN DE ALGUNOS FRUTALES

Dr. Luis Salgado S.
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. Que significa drenaje inadecuado?

Si el drenaje de un suelo es o no inadecuado depende de una serie de factores que se interrelacionan entre sí tales como: cantidad de agua caída, duración e intensidad de la lluvia, cantidad de agua de riego aplicada, frecuencia de los riegos, eficiencia de los métodos de riego, propiedades físicas del suelo, temperatura del suelo y el aire, especie de cultivos, variedad y estado de desarrollo, entre otros. Consecuentemente, el diseño de un sistema de drenaje es sitio específico y para tales efectos es necesario considerar variables climáticas, del suelo y del cultivo.

Un drenaje inadecuado se caracteriza por un exceso de agua en el suelo el cual excluye o elimina el aire presente en el espacio poroso y limita la actividad biológica. El impacto del exceso de agua en el suelo afecta el microambiente alrededor de las raíces y consecuentemente el desarrollo, supervivencia y rendimiento de las plantas.

Los procesos afectados incluyen el intercambio de oxígeno y anhídrido carbónico con la atmósfera, los procesos de óxido-reducción en el suelo y por lo tanto el metabolismo de los gases, la disponibilidad y captación de nutrientes, la acumulación de anhídrido carbónico, etileno y otras sustancias tóxicas o productos secundarios tales como nitritos, fierro y manganeso altamente solubles. Estas condiciones pueden impactar directa o indirectamente la producción de los cultivos evitando la germinación de las semillas, restringiendo la elongación y el crecimiento radical, matando células de las raíces, provocando clorosis, curvatura del tallo principal, disminuyendo el crecimiento y acumulación de materia seca, aparición de raíces adventicias y, en casos extremos, la muerte total de la planta.

1.2. Exceso de agua y aireación del suelo.

Para la respiración y otras actividades metabólicas las raíces requieren oxígeno. Ellas absorben agua y nutrientes disueltos desde el suelo y producen dióxido de carbono el cual se intercambia con el oxígeno de la atmósfera. Este proceso de aireación, que tiene lugar por difusión y transporte de masas, requiere que en el suelo existan poros grandes ya que los poros pequeños contribuyen al almacenamiento del agua en el suelo. Los poros no capilares, los cuales son grandes y fácilmente vaciables en forma natural o mediante una obra de drenaje, funcionan como canales para el intercambio de los gases.

Además de agua para su desarrollo las plantas requieren calor, luz, oxígeno y nutrientes. El exceso de agua en el suelo interfiere con la aireación y por lo tanto controla la disponibilidad de estos factores esenciales.

El proceso de aireación es uno de los mas importantes y determinantes en el crecimiento de las plantas y producción de los cultivos. Las raíces de las plantas requieren oxígeno para la respiración tanto como para la mineralización de la materia orgánica. Bajo condiciones aeróbicas, los electrones liberados de los sustratos se combinan con los iones de oxígeno e hidrógeno presentes para producir energía, agua y anhídrido carbónico. Cuando el oxígeno se consume a mayor tasa que la que puede ser intercambiada con la atmósfera, se produce una condición de déficit. Los efectos que esta situación provoca se presentan en forma generalizada en la figura 1.

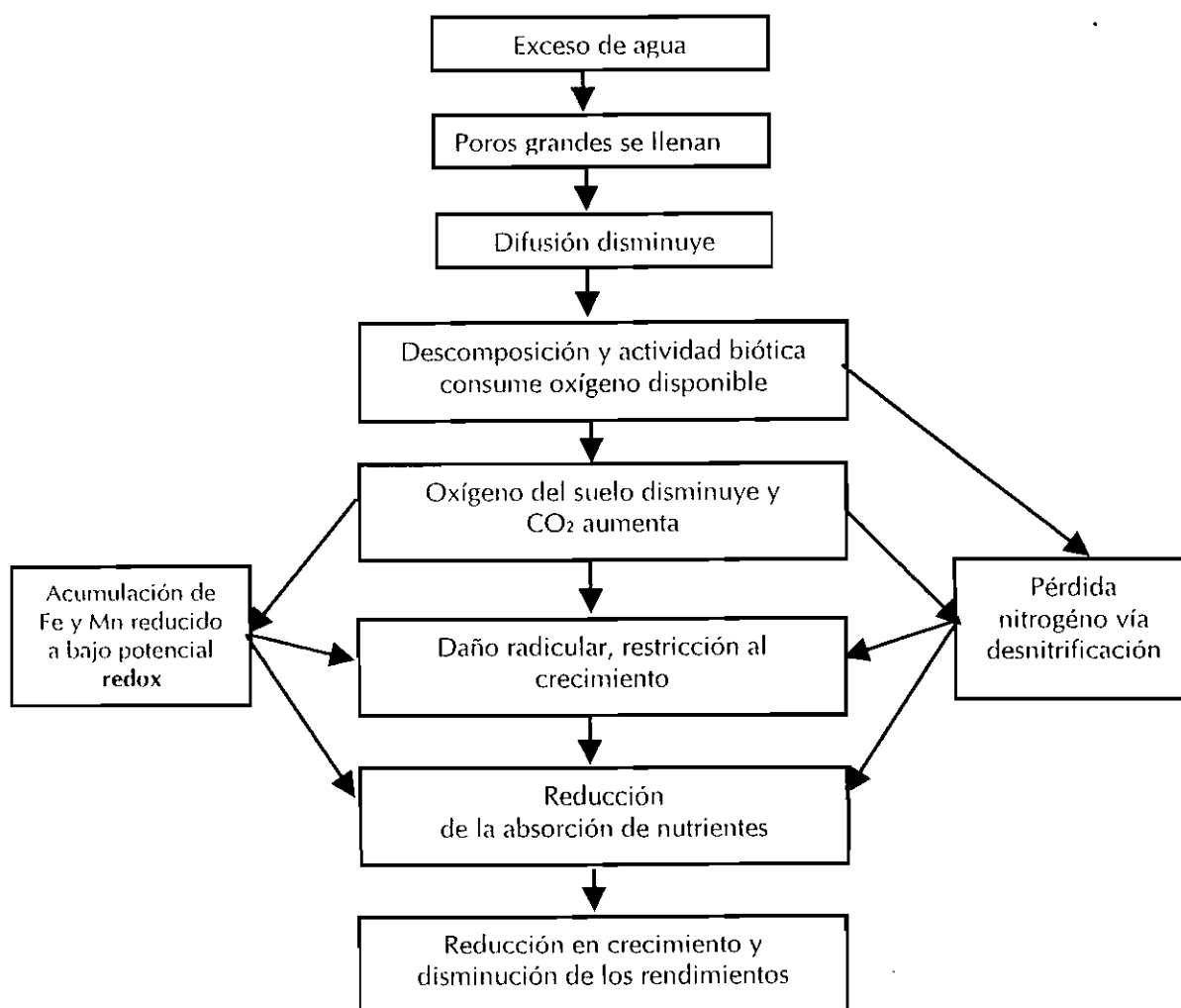


Figura 1. Proceso tendiente a la reducción del crecimiento y disminución de los rendimientos debido al exceso de agua en el suelo.

Una forma de expresar la aireación del suelo es a partir de la porosidad del mismo. En general se dice que un suelo es adecuado para el desarrollo radical si el espacio lleno por aire está en el rango de 5 a 15 %. Algunos autores señalan un valor mínimo de 10%. Otros autores señalan que el valor óptimo se encuentra entre 4 y 50% dependiendo de la textura del suelo, el tipo y edad del cultivo, estado de desarrollo, condiciones ambientales, etc.

Otra forma de expresar el grado de aireación es a partir del contenido de oxígeno obtenido desde muestras de suelo. En suelos bien aireados la composición del aire del suelo está estrechamente relacionada con la atmósfera y básicamente es del 20% oxígeno y 0.03% anhídrido carbónico. Contenidos de oxígeno en el rango de 8 a 14% se consideran como mínimos no restrictivos al proceso de respiración radicular. Valores críticos resultan de la combinación de varios factores incluyendo propiedades físicas del suelos tales como textura y estructura, profundidad del suelo, contenido de agua, materia orgánica y, por supuesto, temperatura.

En la figura 2 se indica el efecto de la disminución del oxígeno como consecuencia del tiempo de inundación y la temperatura. La tasa de disminución de oxígeno está estrechamente relacionada a la actividad metabólica y la temperatura del suelo.

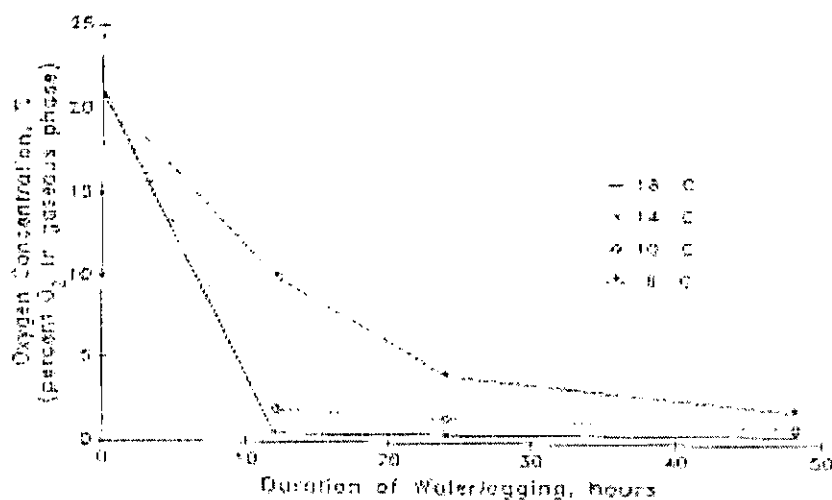


Figura 2. Concentración de oxígeno disuelto en la solución del suelo en función del tiempo de inundación (Skaggs y Van Schilfgaarde, 1999).

Un mejor indicador del estado de aireación de un suelo es la Tasa de Difusión de Oxígeno (TDO). Como se ha dicho anteriormente, en la superficie del suelo, la composición del aire es aproximadamente la misma que la de la atmósfera. Por otra parte, en la medida que aumentamos en profundidad, disminuye el contenido de oxígeno y aumenta el de anhídrido carbónico como resultado del proceso de respiración. Asimismo, la tasa de intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera disminuye en la medida que aumenta el contenido de humedad del suelo. Bajo condiciones de inundación el contenido de oxígeno decrece a valores inferiores al 1% y la TDO se aproxima a cero. En términos generales, la TDO en el agua es aproximadamente 10.000 veces inferior a la existente en el sistema poroso.

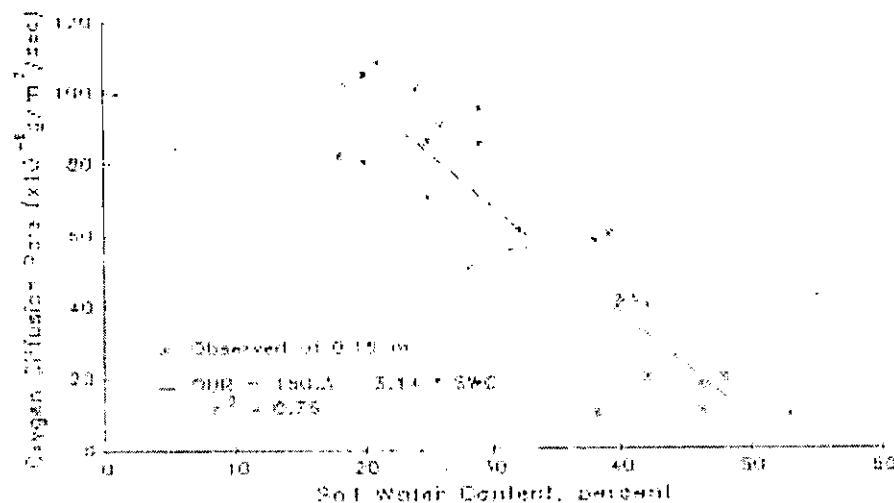


Figura 3. Tasa de difusión de oxígeno (TDO) y contenido de humedad del suelo .
(Skaggs y Van Schilfgaarde, 1999).

Una forma de estimar la TDO de un suelo es a partir de la siguiente expresión, donde θ_w es el contenido de humedad del suelo en volumen:

$$TDO = 160.3 - 3.14 * \theta_w$$

En general, las raíces de la mayoría de las plantas no crecen con valores de TDO iguales o inferiores a 20×10^{-8} gr/cm². Para germinación y emergencia de la semilla se requieren valores del orden de 40 y 80 gr/cm².

En la figura 4 se aprecia como varía la TDO a diferentes profundidades como consecuencia de diferentes profundidades del nivel freático. Esta relación estaría indicando entonces que la TDO podría verse fuertemente afectada a nivel de la profundidad típica de las raíces de los frutales, aún cuando el nivel freático no se encuentre muy cercano a la superficie.

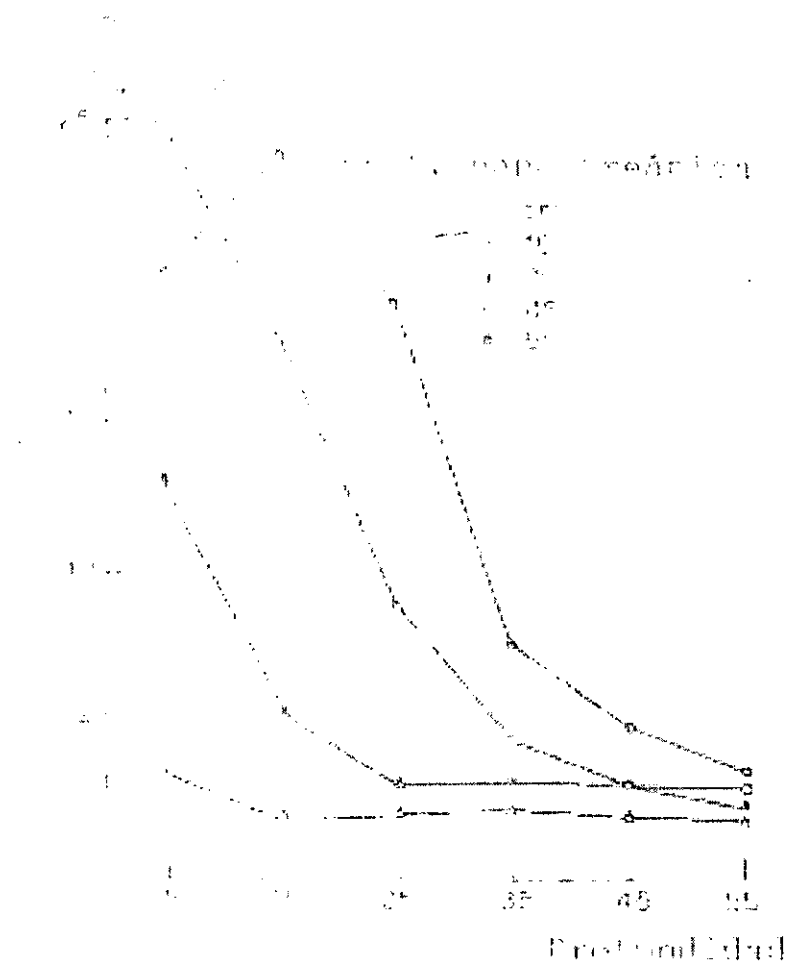


Figura 4. Tasa de difusión de oxígeno (TDO) y profundidad del suelo (Wessling, 1974).

La escasez de oxígeno en el suelo trae como consecuencia la asfixia radicular. Inicialmente mueren las raíces mas finas pero si las condiciones de anaerobiosis persisten, mueren también las raíces fibrosas y aún las mas gruesas con lo que la absorción y la traslocación radicular quedan seriamente afectadas. La asfixia puede dañar parte del sistema radical o su totalidad. En el primer caso, si los daños no son demasiado severos, puede producirse una regeneración, sobre todo si las condiciones del suelo mejoran a través de un sistema de drenaje subsuperficial, pero si el porcentaje de sistema radicular dañado es alto, los daños son irreversibles y el árbol muere irremediablemente.

Cundo la inundación o encharcamiento y la asfixia se producen durante el invierno, el árbol puede brotar al llegar la primavera, a expensas de las reservas de madera. La brotación en ese caso es pobre, y si no hay regeneración radicular, se va debilitando paulatinamente hasta llegar a la muerte al cabo de pocas semanas. Si el daño se produce durante el período vegetativo, el árbol puede manifestar clorosis y deprimirse lentamente o por el contrario morir en muy pocos días si el encharcamiento continúa.

2. RESPUESTA DE LOS FRUTALES A LA MALA AIREACION

2.1. Efecto sobre la función radical, su crecimiento y desarrollo.

El sistema radical de un árbol adulto lo forman el conjunto de todas sus raíces. En dicho sistema se encuentran raíces pivotantes, superficiales, fibrosas, leñosas, primarias y de otros órdenes, pelos radicales, raíces absorbentes y en crecimiento activo y raíces de anclaje. Este sistema cumple una función mecánica de anclaje al suelo; funciones fisiológicas de absorción de agua y nutrientes, circulación a través de los mismos y acumulación y almacenamiento de reservas en sus tejidos y funciones biológicas de respiración y crecimiento tanto en longitud como grosor y por ramificación.

Al estar el sistema radical de un árbol inmerso en el suelo, la naturaleza de éste va a influir en el cumplimiento de esas funciones y marcadamente en su crecimiento y desarrollo. Además de las características genéticas propias de la especie, las características del suelo que mas condicionan el crecimiento y desarrollo radical son la aireación y contenido de oxígeno; la temperatura del suelo y sus variaciones; la humedad y sus variaciones; el contenido de nutrientes y la estructura y textura

Bajos niveles de difusión de oxígeno limitan la respiración de las raíces y el intercambio de gases tales anhídrido carbónico y etileno. Existen muchas evidencias que la rápida disminución del contenido de oxígeno es el principal mecanismo de daño radical.

El daño radical tiende a ser a la forma de disminución o término del crecimiento durante períodos de inundación debido principalmente a la pérdida de energía normalmente obtenida a través de la respiración aeróbica. El contenido de oxígeno dentro de la zona radical normalmente cae a niveles críticos dentro de pocas horas de producida la inundación. Consecuentemente, la respuesta a una disminución de la elongación de las raíces tiende a ser muy rápida, especialmente a altas temperaturas, lo cual, sin embargo, no necesariamente significa la muerte de la raíz.

Olien (1987) señala que el peso seco de raíces se redujo considerablemente al someter plantas de manzano a inundaciones de seis semanas de duración durante el período de verano. El crecimiento anual del tronco se redujo en aproximadamente un 41% respecto del control tanto para inundaciones de primavera como verano. A su vez, el peso seco de las hojas se redujo en un 48% y el de las raíces fue de un 43% para las mismas condiciones de inundación.

En investigaciones en las cuales se ha mantenido un nivel freático estático a cierta profundidad de la superficie se ha encontrado un escas a nulo crecimiento de las raíces bajo el nivel del agua. Battilani y Ventura (1997) reportan que bajo condiciones de un nivel freático superficial (a 85 cm. Bajo la superficie del suelo), con un ascenso capilar hasta 40 – 50 cm desde la superficie durante el período de crecimiento, indujeron un desarrollo radical superficial y redujeron el volumen del sistema haciendo a los durazneros muy vulnerables a las variaciones del contenido de humedad del suelo. Bajo tales condiciones el riego empeoró la situación. Los resultados que ellos obtuvieron indican que bajo

condiciones de inundación, los durazneros adoptan mecanismos de autorregulación tales como reducción en la actividad radical y en la fotosíntesis produciendo efectos muy similares a aquellos observados bajo condiciones de déficit de agua (estrés). Estos efectos no se observaron cuando el nivel freático se mantuvo a una profundidad de 225 cm.

La mayoría de las sustancias tóxicas encontradas en el suelo son consecuencia de una respiración anaeróbica. El producto tóxico principal de este tipo de respiración es el nitrito. A un pH bajo la conversión incompleta del nitrito a nitrógeno gaseoso puede inducir a la formación de ácido nítrico y si la condición anaeróbica continúa por largo tiempo puede llegar incluso a la formación de anhídrido sulfuroso el cual puede definitivamente matar las raíces.

2.2. Efecto sobre el crecimiento y desarrollo de los brotes.

Al igual que las raíces, los brotes de las plantas pueden responder rápidamente a condiciones de inundación. Algunos de estos efectos son: secado de los brotes, aumento de la resistencia al flujo del agua, aumento de la temperatura de la planta, clorosis, senescencia prematura, disminución del crecimiento y de la acumulación de materia seca y en casos extremos la muerte de la planta. Olien (1987) encontró que el peso seco de los brotes de manzano se redujeron en aproximadamente un 43% cuando los árboles se mantuvieron bajo condiciones de inundación por períodos de seis semanas en verano.

Se cree que las condiciones anaeróbicas resultantes de una inundación aumentan la resistencia radical resultando en una rápida deshidratación de los brotes. Este secamiento de los brotes se acentúa si los estomas se encuentran abiertos y permiten una rápida pérdida de agua.

Por otra parte, las condiciones de inundación afectan el crecimiento de la plantas debido a una disminución en la absorción de nutrientes y en la disponibilidad de ellos. La absorción de nutrientes requiere la presencia de energía y como bajo condiciones anaeróbicas no hay producción de energía, se reduce la captación de nutrientes. Como uno de los elementos mas afectados por las condiciones de inundación es el nitrógeno, las pérdidas de rendimiento pueden reducirse mediante la aplicación de fertilizantes nitrogenados inmediatamente después de cesado el período de inundación.

Minessy et al (1971) realizaron una investigación en la cual sometieron dos variedades de cítricos (naranja Washington y mandarina Balady) a diferentes profundidades de niveles freáticos para estudiar la absorción de diferentes elementos. En la figura 5 se observa que en ambas variedades la absorción de la mayoría de los elementos es casi nula a niveles freáticos inferiores a 75-80 cms.

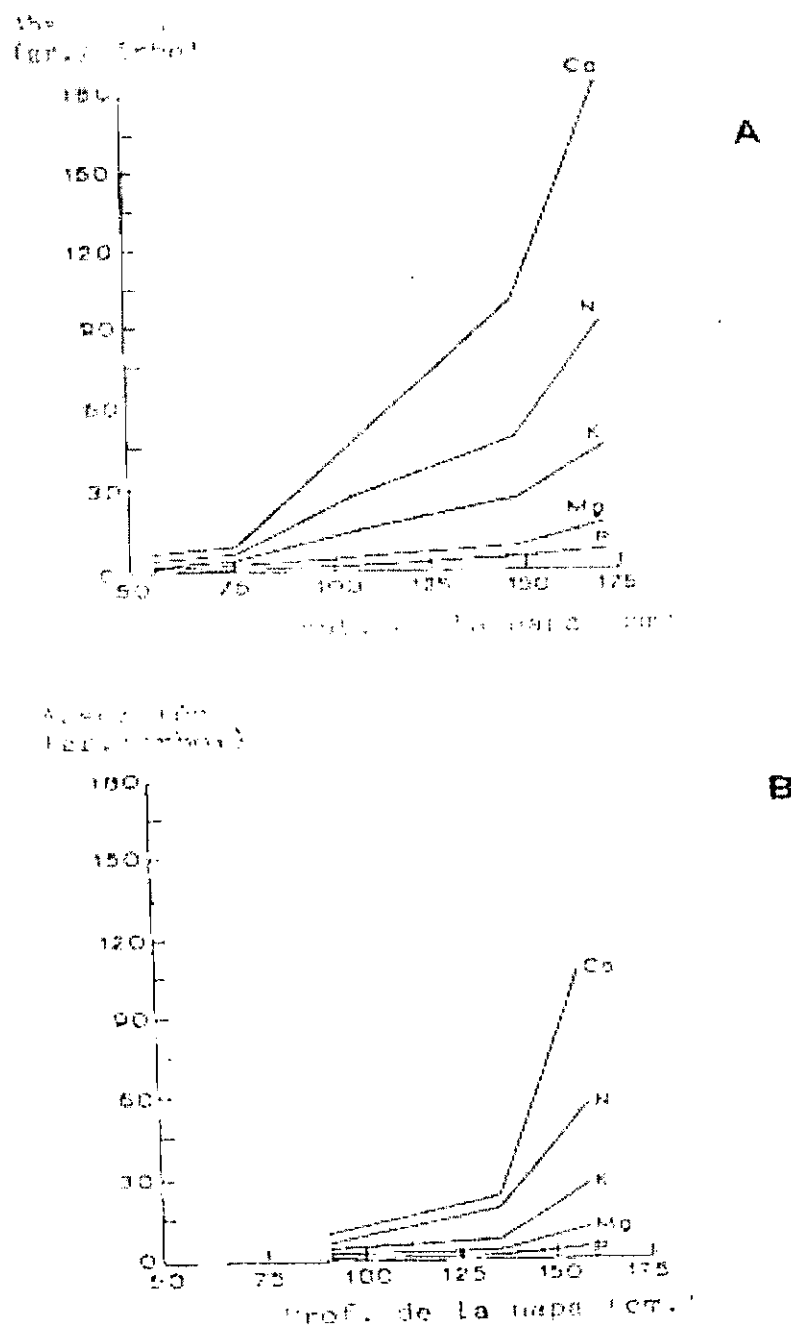


Figura 5. Efecto de la profundidad de la napa en la absorción de algunos nutrientes en naranjo Washington (A) y mandarina Balady (B) (Minessy et. Al., 1971).

Por su parte, Olien (1989) midió el contenido de nutrientes en las hojas de durazneros sometidos a inundación en diferentes épocas del año. Sus resultados indican que los contenidos de N, P, K y Cu muestreados a fines de verano fueron significativamente menores en árboles sometidos a inundación durante el verano que aquellos que no lo fueron. Asimismo, reporta que los contenidos de los mismos elementos no fueron afectados por inundaciones durante el otoño o primavera.

2.3. Efectos sobre la producción

Como se indicó anteriormente, la literatura disponible es relativamente escasa en cuanto al efecto que tiene el mal drenaje en la producción y productividad de los frutales. Sin embargo, es posible afirmar que debido al sistema radical relativamente inflexible que tiene la mayoría de los frutales, con raíces activas desarrollándose a escasa profundidad, parece ser fácilmente afectado por la presencia de una napa freática no muy profunda. Sin embargo, la susceptibilidad de un frutal a un drenaje interno pobre dependerá, además de la especie y variedad, de su edad y la estación climática. Así por ejemplo, las raíces del manzano sufrirán un daño mayor por exceso de agua en verano que en invierno ya que en éste último período la planta se encuentra en estado de dormancia.

En un trabajo clásico realizado por Van't Woudt y Hagan (1957) señalan que el nogal requiere de una napa a no menos de 2.5 a 3.0 metros de profundidad. Penman, citado por Oosterbaan (1988) observó que los cítricos permanecen saludables y fructíferos sólo por 8 a 10 años cuando la napa permanece a 1.2 metros de profundidad. Mas allá de esa edad requieren profundidades mayores.

En un trabajo realizado por Minessy et al. (1975) en la parte norte de la República Árabe Unida, (figura 6) encontraron que el rendimiento relativo de naranja Washington y mandarina Balady aumentó proporcionalmente al aumentar la profundidad de la napa. A profundidades del orden de 75-80 cm. el rendimiento fue cero, alcanzando el máximo cuando el nivel freático se mantuvo a los 175 cm.

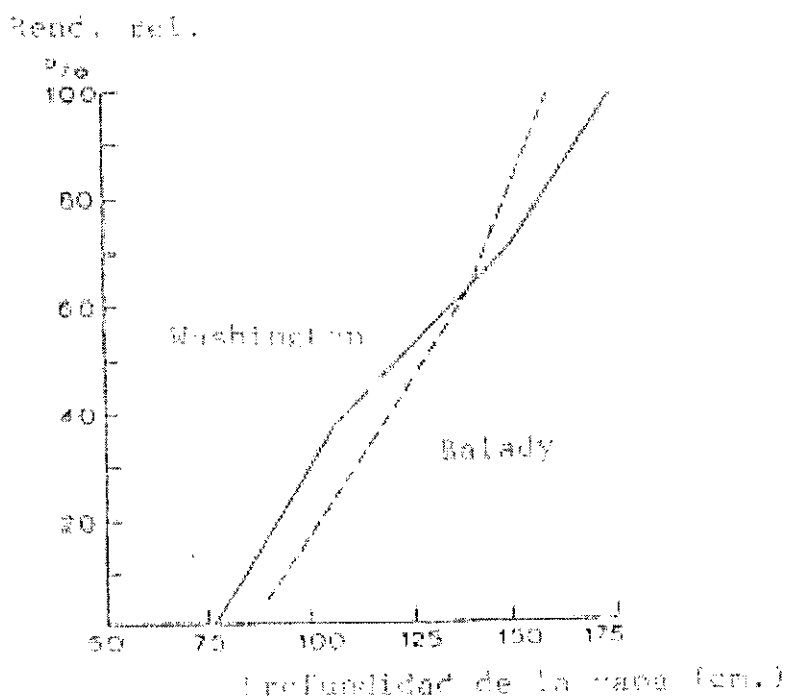


Figura 6. Efecto de la profundidad de la napa en el rendimiento de dos cítricos (Minessy et. al, 1971).

3. DISEÑO DE OBRAS DE DRENAJE

De acuerdo a lo manifestado en los párrafos anteriores, al igual como en otros cultivos, el diseño de un sistema de drenaje para frutales debe abordarse según las características propias del área donde se presenta el problema. Estos problemas pueden ser básicamente por inundación o encharcamiento o debido a la presencia de un nivel freático muy cercano a la superficie del suelo. En el primer caso nos encontramos ante un problema de drenaje superficial y en el segundo caso con un problema de drenaje subsuperficial.

Un sistema de drenaje superficial es el conjunto de obras requeridas para evacuar o eliminar los excesos de agua acumulados en la superficie del suelo, y un sistema de drenaje subsuperficial es el conjunto de obras necesarias para evacuar o eliminar los excedentes de agua acumulados en el interior del suelo, a través de un control de la profundidad de la napa.

En cualquiera de los dos casos es necesario tener presente que para el adecuado diseño de un sistema es necesario conocer previamente cual es el origen y cantidad de la recarga, cuales son las características físicas del suelo y cuales son las exigencias de los cultivos que vamos a colocar. En otras palabras, para un buen diseño es necesario conocer las características hidrodinámicas del suelo así como los criterios de drenaje.

3.1. Causas de los problemas de drenaje

Los problemas de drenaje tienen su origen en diversas causas, entre las que destacan: la naturaleza de la recarga, el suelo y la topografía. En los párrafos siguientes se describe brevemente cada uno de ellos.

3.1.1. Recarga.

La recarga, coeficiente de drenaje o exceso de agua que crea el problema de drenaje, tiene a su vez varios orígenes: lluvia, riego, filtraciones, inundaciones, etc. Estas causales pueden presentarse individualmente o como una combinación de dos o más de ellas, situación que obliga a conocer exactamente cuál es el origen y cantidad de la recarga, para poder hacer un adecuado dimensionamiento del sistema de drenaje.

a. Recarga por lluvia.

En zonas húmedas, donde la precipitación excede la evapotranspiración, es factible esperar que se produzcan excesos de agua. Bajo tales condiciones y en presencia de una topografía desfavorable y baja capacidad de transmisión de agua de los estratos superiores del suelo, éstos problemas pueden ser aún más críticos. Si los excesos se presentan durante el período vegetativo de los cultivos, resultan serias limitaciones al crecimiento, desarrollo y producción.

En relación con la lluvia como principal o único componente de la recarga, es indispensable conocer la cantidad total de agua en diversos periodos de tiempo (días) y la frecuencia de ocurrencia o período de retorno (años) de los mismos. El primer concepto está en estrecha relación con la tolerancia de los cultivos al exceso de agua y el segundo dice relación con el riesgo que estamos dispuestos a afrontar al decidir los criterios de drenaje y variables a usar en el diseño del sistema.

b. Recarga por riego.

En zonas áridas, donde la evapotranspiración excede la precipitación, son los excesos de riego los que en estas circunstancias crean los problemas de drenaje. Estos efectos se ven considerablemente influidos por los métodos de riego utilizados. Si la eficiencia de aplicación del agua de riego es baja y las pérdidas por percolación profunda son altas, es posible esperar una elevación de la napa freática del suelo a niveles que pueden limitar el desarrollo radicular.

Para ilustrar el impacto de la percolación profunda sobre la napa freática, asumamos que las pérdidas por percolación profunda sean del orden del 20% en un riego de 1.000 m³/ha, es decir, 200 m³/ha (20 mm) se pierden por dicho concepto. Ahora bien, si estos 20 mm llegan hasta una napa ya existente y si la porosidad drenable del suelo fuese del 10%, significa que el nivel freático puede elevarse en 20 cm en cada riego. Consecuentemente, si no existe un adecuado sistema de drenaje natural o artificial, la napa podría alcanzar niveles que a la larga puede hacer absolutamente improductivo un terreno. Como ejemplo de ésta situación es posible mencionar lo ocurrido en el Bajo Indo (Pakistán) donde antes de 1923, en que se introdujo el riego, la napa se encontraba a más de 4 m de profundidad y, 50 años más tarde, en el 75% de los sitios está a menos de 1 metro.

c. Recarga por filtraciones.

Si la recarga proviene de aguas externas al área de mal drenaje, tales como: pérdidas por filtración en cauces naturales y/o canales que cruzan el área afectada; percolación de regadíos realizados en zonas o áreas más elevadas topográficamente; flujos subterráneos provenientes de zonas vecinas situadas a una cota igual o superior; existencia de agua artesiana en el subsuelo, exceso de aguas superficiales e infiltración provenientes de lagos, embalses, cauces naturales y canales situados fuera del área afectada, se deberá proceder también a la determinación de su origen y cuantificación, para poder hacer posteriormente un adecuado dimensionamiento del sistema.

A modo de resumen, se puede decir que la determinación de la recarga, sea ésta por lluvia, excesos de riego o cualquier otra causa, se debe hacer con datos provenientes del lugar afectado, por cuanto es una variable que incide directamente sobre el espaciamiento de los drenes y depende de una serie de factores locales. La lluvia constituye una excepción a esta regla, porque es necesario trabajar con registros históricos que sólo están disponibles en lugares donde hay estaciones pluviométricas. Por lo general, entonces, será necesario hacer interpolaciones o extrapolaciones para adaptar tales datos a la latitud deseada.

3.1.2. Suelos y topografía.

Desde el punto de vista del suelo, las restricciones al drenaje natural pueden ser de diverso origen. Entre las más comunes es posible mencionar la formación de horizontes o estratas lenta o muy lentamente permeables; estratas u horizontes cementados; posiciones topográficas desfavorables, etc. Muchas veces se produce una convergencia de estos efectos limitantes, de modo que los problemas de drenaje alcanzan tal magnitud, que excluye el uso o manejo de los suelos para cultivos e incluso para praderas.

Consecuentemente, el buen o mal drenaje de un suelo es la resultante de factores externos e internos del suelo. Entre los primeros se cuenta la pendiente, que influye sobre el escurrimiento superficial; entre los segundos, la permeabilidad y el material sobre el cual descansa el suelo (substratum).

3.2. Antecedentes para el diseño

El diseño de un sistema de drenes superficiales o subsuperficiales requiere de la definición de parámetros y criterios de diseño, los cuales se utilizan en la solución de las ecuaciones para el cálculo del espaciamiento entre drenes. Como, a su vez, las ecuaciones que se utilizan para tal propósito pueden ser para régimen permanente o impermanente, los parámetros y criterios que se requieren en cada caso son diferentes.

Los parámetros de diseño dicen relación con las características físicas e hidrodinámicas del suelo tales como conductividad hidráulica, porosidad drenable, textura, estructura y retención de humedad.

Los criterios de diseño, como su nombre lo indica, se refieren a los criterios o decisiones que el profesional debe tomar en consideración para satisfacer los requerimientos que el sistema exige. Entre estos criterios podemos mencionar la recarga, la profundidad del nivel freático en el punto medio entre dos drenes, la profundidad radicular, la profundidad de los drenes, la carga hidráulica y el tiempo de drenaje. Determinar los criterios de drenaje propios del lugar donde se va a diseñar un sistema de drenes requiere de una completa información de terreno que no siempre está disponible. Para formular adecuadamente dichos criterios será necesario tener en consideración los siguientes factores:

- Condiciones hidrológicas, las cuales determinan la cantidad de agua que debe ser drenada en un período específico de tiempo.
- Condiciones agronómicas, las cuales, dependiendo del cultivo y del suelo, determinan el límite de la zona radicular y el tiempo máximo que los cultivos pueden soportar condiciones de exceso de agua.
- Condiciones del suelo, las cuales determinan las relaciones entre: aireación y contenido de humedad; nivel freático y contenido de humedad y nivel freático y ascenso capilar.
- Condiciones económicas, las cuales determinan las relaciones costo/beneficio y en consecuencia la conveniencia de construir o no un sistema de drenaje.

3.2.1. Criterios de drenaje

Los criterios de drenaje que se consideran en un diseño son: la recarga, la profundidad de la napa, la profundidad de los drenes y la carga hidráulica. Como en los párrafos anteriores ya se hizo mención a la recarga, a continuación se tratarán sólo los tres restantes.

a. Profundidad de la napa

Este es un criterio de diseño de base netamente agronómica y está determinado por las características de arraigamiento de los cultivos y la sensibilidad que éstos tengan al exceso de agua y en consecuencia al efecto que esta situación produzca sobre los rendimientos.

Es necesario aclarar que cuando en drenaje hablamos de profundidad óptima o efectiva, se entiende que es aquella profundidad a la cual puede encontrarse el nivel freático sin que los cultivos presenten serias disminuciones en los rendimientos.

Honorato (1993) indica que la profundidad de arraigamiento de algunos frutales es la que se indica en la tabla siguiente y que si dicha profundidad es inferior al umbral límite indicado, los rendimientos podrían disminuir en un 30% o más.

Tabla 1. Profundidad de arraigamiento de algunas especies frutales (Honorato, 1993).

Especie	Umbral límite (cm)	Arraigamiento activo (cm)
Cítrico	40	80
Ciruelo	50	100
Vid	30	60
Duraznero	45	80
Peral	50	100
Manzano	40	100

b. Profundidad de los drenes.

La profundidad óptima de los drenes es aquella que permite satisfacer el criterio de profundidad radicular efectiva (P_e) al menor costo posible. En teoría, dicha profundidad no puede ser inferior a la profundidad efectiva. En la práctica, es igual a la profundidad efectiva más el rango sobre el cual fluctúa el nivel freático. Generalmente se encuentra entre 1.0 y 2.0 m bajo la superficie del suelo.

La profundidad mínima de los drenes dependerá del régimen de flujo que se considere para el cálculo del espaciamiento. Esta profundidad mínima deberá ser el valor máximo resultante de las profundidades calculadas según el siguiente procedimiento:

i) Bajo condiciones de régimen permanente la profundidad mínima de los drenes deberá ser igual a la suma de las siguientes distancias:

- La profundidad radicular efectiva seleccionada;
- el 50% del ascenso del nivel freático producido por la recarga individual máxima ocasionada por una aplicación local de agua;
- un valor de carga hidráulica residual de 0.1 m.

ii) Bajo condiciones de régimen no permanente la profundidad mínima de los drenes estará dada por:

- La profundidad radicular efectiva seleccionada;
- el 100% del ascenso del nivel freático producido por la recarga individual máxima debida a una aplicación local de agua;
- un valor residual de carga hidráulica de 0.1 m.

c. Carga hidráulica

En un sistema de drenes paralelos, subsuperficiales, sometidos a una condición de régimen permanente, donde la recarga es igual a la descarga y el nivel freático permanece constante, para que el agua se mueva hacia los drenes se requiere que exista una cierta carga hidráulica (Δh). Es decir, en el punto medio entre los drenes debe haber una cierta altura de agua por sobre el nivel de los drenes.

No existen suficientes antecedentes que permitan recomendar un valor único de carga hidráulica para cualquier condición. Es necesario tener presente que, en la medida que aumenta el valor de la carga hidráulica el flujo hacia los drenes será más eficiente y rápido por cuanto aumenta el gradiente hidráulico. Según este principio, pareciera conveniente utilizar valores lo más grande posible. Sin embargo, ello incide directamente sobre la profundidad de los drenes y por tanto sobre los costos. Considerando ambas circunstancias y la experiencia profesional acumulada, se recomiendan valores de carga hidráulica que pueden fluctuar entre 0.2 y 0.5 m.

3.2.2. Parámetros de drenaje

Desde el punto de vista del drenaje, las características hidrodinámicas más relevantes de un suelo y que tienen que ver directamente con el cálculo del espaciamiento entre drenes subsuperficiales son: la conductividad hidráulica, el espacio poroso drenable y el espesor de la región de flujo.

En un suelo isotrópico y homogéneo, estas características son constantes en cualquier sentido de un eje de coordenadas cartesianas. No obstante, la mayoría de los suelos son generalmente de tipo anisotrópico y heterogéneo, razón por la cual es posible que cada uno de estos factores varíe considerablemente tanto espacial como temporalmente. Por la

misma razón, no es prudente hablar de “constantes” del suelo. Generalmente, los valores que se obtienen experimentalmente son meras aproximaciones a la realidad.

a. Conductividad hidráulica

El diseño y funcionamiento de un sistema de drenes subsuperficiales depende en gran medida de la conductividad hidráulica o conductividad saturada del suelo (K). Todas las ecuaciones para determinar espaciamiento entre drenes consideran este parámetro. Consecuentemente, para diseñar o evaluar un sistema de drenaje es necesario determinar el valor de la conductividad tan preciso como sea posible. Un error en el cien por ciento de la conductividad provoca un error del orden del 40% en el espaciamiento. Considerando las variaciones que presenta un suelo, diferencias puntuales del cien por ciento entre uno y otro no son del todo extrañas cuando se hacen determinaciones en terreno.

Como ya se ha dicho, la conductividad hidráulica de un suelo varía tanto espacial como temporalmente. Esto significa que para realizar un adecuado diseño de un sistema de drenaje es necesario encontrar un valor representativo del suelo. Para encontrar dicho valor la persona que realice las determinaciones deberá tener conocimiento acerca de las relaciones teóricas entre el sistema de drenaje que enfrenta y las condiciones de drenaje imperantes en el área en estudio. Esto significa que el investigador deberá tener un conocimiento previo acerca de la efectividad del drenaje y otras relaciones tales como: a) la profundidad a que se ubicarán los drenes y la conductividad hidráulica a esa profundidad; b) la profundidad de la región de flujo y el tipo de acuífero; c) la variación de la conductividad hidráulica con la profundidad y d) la anisotropía del suelo.

b. Porosidad drenable

El espacio poroso drenable es una parte del espacio poroso total, y corresponde al volumen de agua que pierde un acuífero no confinado al bajar el nivel freático desde una posición inicial a un nivel final más profundo. También puede definirse como la diferencia de contenido de humedad del suelo, inmediatamente encima del nivel freático, en ausencia de evaporación.

En atención a que en un acuífero freático la compresibilidad es despreciable, este concepto es equivalente al de rendimiento específico, espacio poroso drenable o porosidad efectiva. Es una cantidad adimensional normalmente expresada como porcentaje y sus valores fluctúan entre menos de un 5% en suelos arcillosos hasta más de 35% en suelos arenosos gruesos.

De lo anterior, se desprende que los poros finos de un suelo no contribuyen al espacio poroso drenable debido a que la fuerza con que el agua es retenida, es mayor que el peso de la misma. Como consecuencia de lo anterior, desde los poros pequeños no hay drenaje de agua por efecto de la gravedad. Esto explica en parte, por qué en suelos arcillosos se requiere un menor espaciamiento de los drenes que en suelos arenosos y por qué los suelos arcillosos retienen mayor cantidad de agua que los arenosos.

c. Región de flujo

La región de flujo es la zona saturada del suelo en la cual ocurre el flujo. Consecuentemente, es conveniente diferenciar entre la situación sin drenes y con drenes.

En una condición sin drenes (sin proyecto) la región de flujo está limitada en su parte superior por la posición del nivel freático (donde el agua se encuentra a una presión igual a la presión atmosférica) y en su parte inferior por el estrato impermeable causante de la presencia de esta situación de saturación.

En una condición con drenes (con proyecto) a su vez podemos distinguir dos situaciones. Bajo una condición de régimen permanente el límite superior de la región de flujo será la posición del nivel freático en el punto medio entre dos drenes laterales y bajo una condición de régimen no permanente el límite superior será el punto medio entre el nivel freático inicial y final entre dos períodos de recarga. En ambos casos el límite inferior es el estrato impermeable.

La identificación de esta región de flujo es fundamental para decidir a qué profundidad deben realizarse las determinaciones de conductividad hidráulica y porosidad drenable. Es decir, si la región de flujo está entre 1.5 m y 4.0 m de profundidad, la conductividad hidráulica debe determinarse en aquellas estratas que se encuentran comprendidas en dicha profundidad.

4. DISEÑO DE UN SISTEMA DE DRENAJE SUPERFICIAL

El diseño de un sistema de drenaje superficial comprende las siguientes etapas: cálculo de la recarga o coeficiente de drenaje; trazado de la red de drenaje y dimensionamiento de la red.

4.1. Cálculo de la recarga.

Es frecuente que en el diseño de drenes superficiales no se determine la recarga efectiva o coeficiente de drenaje sino que la capacidad de los drenes se determine directamente a partir de la escorrentía máxima obtenida a través de alguno de los métodos conocidos tales como la ecuación racional, el método de la curva número, el método de Cook o cualquier otro disponible en la literatura.

Los sistemas de drenaje superficial controlan el exceso de agua de precipitación y las pérdidas superficiales de agua de riego. En zonas regadas, las descargas superficiales máximas de agua lluvia ocurren fuera de la estación de riego por lo tanto no son simultáneas a las pérdidas por riego.

Los drenes superficiales no se dimensionan para la descarga de diseño de agua de escorrentía, por ser su capacidad generalmente mayor que la requerida para la descarga máxima. Esto se debe a que la sección hidráulica mínima depende comúnmente más de las necesidades de control de erosión, de manejo del suelo y de los equipos empleados en la construcción que de la capacidad de descarga de agua. Excepcionalmente, la red de zanjas abiertas se dimensiona de acuerdo a la descarga máxima de agua de escorrentía.

Para la obtención del coeficiente de drenaje superficial es necesario conocer de antemano ciertos valores de diseño que dependen de la finalidad del sistema y de consideraciones técnico- económicas. Estos valores son el tiempo de drenaje y el período de retorno. El tiempo de drenaje depende del cultivo y está determinado por la tolerancia del cultivo a condiciones de inundación. En cuanto al período de retorno, éste tiene relación con el tiempo de recurrencia para el cual se realiza el diseño.

4.2. Trazado de la red de drenaje.

Las aguas de drenaje provenientes de drenes de campo (laterales y colectores) deben llevarse hacia un dren principal y desde allí a un lugar de descarga natural de las aguas (estero, quebradas, etc.). En lo posible cada uno de los drenes debe descargar sus aguas en forma libre (0,20-0,30 metros de diferencia de cota) para evitar sedimentación, erosión o ingreso de aguas a los terrenos cultivados.

En términos generales, el trazado de la red de drenaje debe consultar los siguientes aspectos: procurar utilizar los drenes naturales o canales de drenaje ya existentes; el canal debe ser capaz de recolectar toda el agua del área que sirve; la salida debe ser conveniente (técnica y económicamente hablando); en lo posible los drenes deben estar localizados en los sitios más bajos del terreno y, las pendientes deben ser tales que no provoquen sedimentación ni erosión.

En áreas con pendiente, donde los drenes o zanjas se trazan casi paralelos a las curvas de nivel, la eliminación de las aguas debe hacerse necesariamente mediante colectores que corren en el mismo sentido de la pendiente. Esto implica la necesidad de construir estructuras tales como saltillos, pedraplenes y construcción de canales con vegetación, para impedir la erosión. Los drenes colectores pueden ser de sección parabólica, triangular o trapecoide, los taludes, no mayores de 4:1 para permitir el paso de maquinaria y el ancho de fondo, no inferior a 2,5 metros.

4.3. Dimensionamiento de la red de drenaje.

Una vez trazada la red es necesario proceder al cálculo de la capacidad de los drenes y el diseño de los canales. Los factores a considerar en el diseño definitivo son los mismos que en el diseño de un canal. Estos factores de diseño son: coeficiente de rugosidad de Manning; velocidad máxima permisible; sección típica (máxima eficiencia); profundidad del agua (tirante); talud y base del dren.

Para el diseño de los drenes se usa la fórmula de Manning ya mencionada y para obtener la sección requerida es necesario considerar que:

- a) Un dren profundo (con tirante alto) proporciona una mayor velocidad que uno superficial (de tirante pequeño).
- b) Un dren profundo favorece el drenaje subsuperficial (aunque no es ese el objetivo de su diseño).
- c) Un dren profundo probablemente tenga una vida útil mayor por cuanto la sedimentación causa menor obstrucción o desbordamiento.
- d) Un canal superficial puede ser más fácil de mantener que uno profundo.

Para controlar la sedimentación inicial se pueden considerar algunos cambios en la sección de diseño. Estos son: aumentar la sección en un 20%; aumentar la base pero no la boca del dren y aumentar la profundidad total del dren en 20 ó 30 centímetros manteniendo el mismo talud.

5. DISEÑO DE DRENES SUBSUPERFICIALES

Un sistema de drenes subsuperficiales tiene como objetivo fundamental el control de la profundidad de la napa freática, de forma que el balance de agua y sales dentro de la zona radicular sea el óptimo para los requerimientos del cultivo, en una condición de clima y suelos específica.

Un sistema de drenes subsuperficiales consta fundamentalmente de tres tipos de drenes: laterales, colectores y dren principal (Figura 7). Los drenes laterales generalmente se disponen paralelos unos a otros y tienen como misión principal el control de la profundidad de la napa. Los drenes colectores, aunque eventualmente también drenan el terreno adyacente, su misión fundamental es transportar el agua extraída por los laterales hasta el dren principal donde se produce la descarga del sistema. El dren principal, que puede ser artificial o natural (río, estero, etc.), es el que en definitiva recoge los excedentes provenientes de varios sistemas.

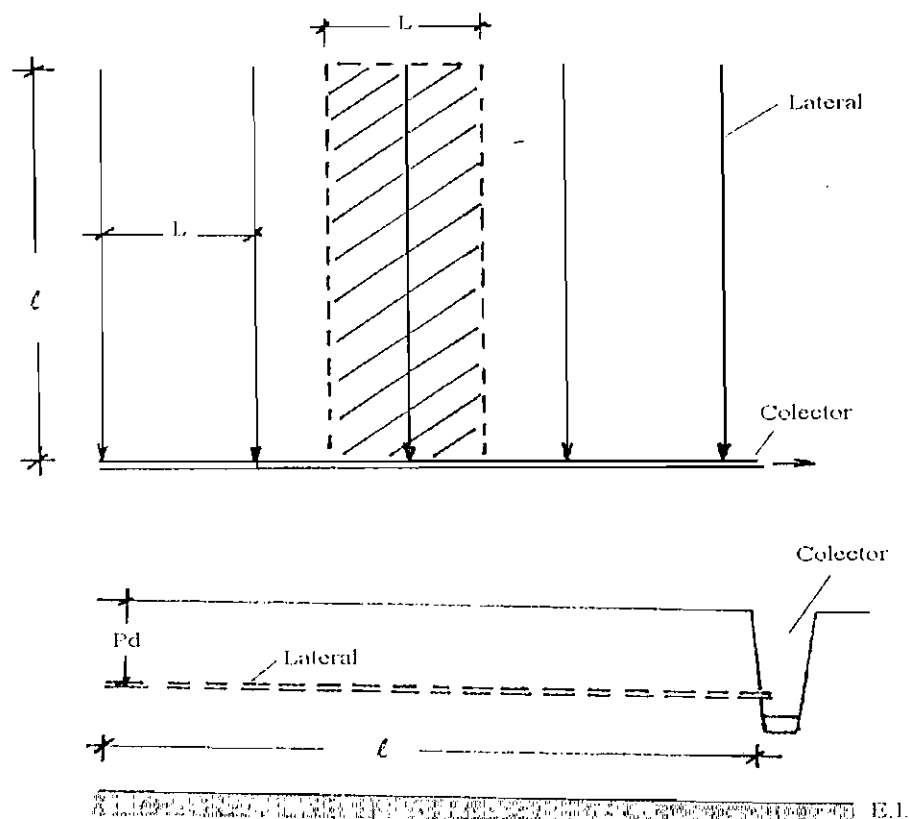


Figura 7. Vista en planta y corte longitudinal de una red de drenaje mostrando laterales y colectores (L = espaciamiento entre drenes; l = largo del lateral; P_d = profundidad del dren; E.I. = estrato impermeable).

La relación entre laterales y colectores puede ser simple o compuesta. Se entiende por una red simple cuando laterales de tubo descargan en colectores zanja. Se entiende por una red compuesta cuando laterales de tubo o zanja descargan en colectores de tubo o zanja, respectivamente. La primera forma de diseño (tubo-zanja) es la más frecuentemente utilizada por las ventajas que tiene para el mantenimiento de la red.

En términos generales podemos señalar que definir las características de diseño significa definir los parámetros y criterios necesarios para determinar el espaciamiento y las características hidráulicas de los laterales para conducir los caudales de diseño. En cuanto a los aspectos constructivos, éstos son fundamentalmente la definición de la disposición de los drenes, los materiales que se utilizarán y las técnicas de construcción que se emplearán. En las secciones siguientes se hace una revisión de cada uno de estos aspectos.

5.1. Espaciamiento entre drenes

El objetivo fundamental de determinar y definir los parámetros y criterios de diseño es para disponer de los elementos de juicio necesarios para proceder al cálculo del espaciamiento o distancia que debe existir entre dos laterales bajo una cierta condición de suelo, clima y cultivo. Dicha distancia se calcula mediante ecuaciones que son expresiones matemáticas deducidas por simplificación de la teoría del flujo del agua subterránea, bajo ciertas condiciones límites preestablecidas. Tales ecuaciones se agrupan en dos grandes categorías: ecuaciones para régimen permanente y ecuaciones para régimen impermanente.

La experiencia ha demostrado que la única forma de tener respuestas confiables en relación al espaciamiento entre drenes es establecer áreas piloto en todos aquellos lugares donde se desea realizar proyectos de drenaje y allí experimentar diversas alternativas de espaciamiento, materiales envolventes, tuberías, etc., y seleccionar aquella que mejor satisface las condiciones imperantes. En otras palabras, el cálculo del espaciamiento mediante el uso de fórmulas debe considerarse sólo como de tipo referencial, independientemente de la precisión matemática que se obtenga en la solución de las mismas.

5.2. Cálculo hidráulico

El cálculo hidráulico de las tuberías significa la determinación de tres parámetros: el caudal de diseño, el diámetro óptimo de las tuberías y la pendiente.

El caudal de diseño corresponde al caudal máximo que debe ser capaz de conducir la tubería. En condiciones de régimen permanente este caudal es igual a la recarga por el área que drenará cada línea de laterales. En condiciones de régimen no permanente dicho caudal dependerá del caudal específico el que a su vez es función del tipo de ecuación utilizada en el cálculo del espaciamiento.

En cuanto al diámetro de las tuberías es necesario recordar que a diferencia de las tuberías para conducción de agua a presión, en que el caudal es constante, en los drenes el caudal aumenta con el largo, desde cero al inicio del lateral, hasta un máximo a la salida del mismo. Consecuentemente, las ecuaciones que relacionan caudal, diámetro y pendiente deben ser corregidas para incorporar esta condición.

El diámetro requerido para conducir una determinada cantidad de agua depende de la pendiente y la pendiente depende del diámetro. En consecuencia, al fijar una variable es posible determinar la otra. Las pendientes mas usadas fluctúan entre el 1.5 el 5 por mil. Schwab (1981) recomienda los siguientes valores:

Tabla 2. Pendiente de los laterales (Schwab, 1981).

Diámetro de la tubería (mm)	Pendiente (%)	Velocidad de agua (m/s)
75	0,20	0,29
100	0,10	0,25
125	0,17	0,24
150	0,05	0,23

5.3. Aspectos constructivos

Terminada la etapa de diseño, es necesario proceder a la determinación de los aspectos constructivos de la red. Esto significa definir: la disposición de la red, las necesidades de material envolvente y la instalación propiamente tal.

5.3.1. Disposición de la red de drenaje.

Como se ha señalado, toda red de drenaje está constituida por laterales o drenes de campo, colectores y drenes principales. El cálculo del espaciamiento está orientado hacia la determinación de la distancia a que debe ubicarse un lateral de otro.

La disposición de la red de drenaje, por otra parte, se refiere a cómo se ubicarán en el terreno, tanto laterales como colectores para que éstos puedan descargar en los drenes principales. Estos últimos deberán ser preferentemente cauces ya existentes (esteros o ríos) o drenes artificiales de gran magnitud.

En esta etapa del proyecto cobra relevancia e importancia, una vez más, el exacto conocimiento de la topografía del terreno y la dirección del flujo subterráneo, por cuanto de ello depende como se dispondrá los drenes laterales. Hasta donde sea posible, éstos deberán instalarse perpendiculares a la dirección del flujo. La figura 8 muestra algunas de las disposiciones más típicas. Su elección dependerá de las condiciones locales imperantes.

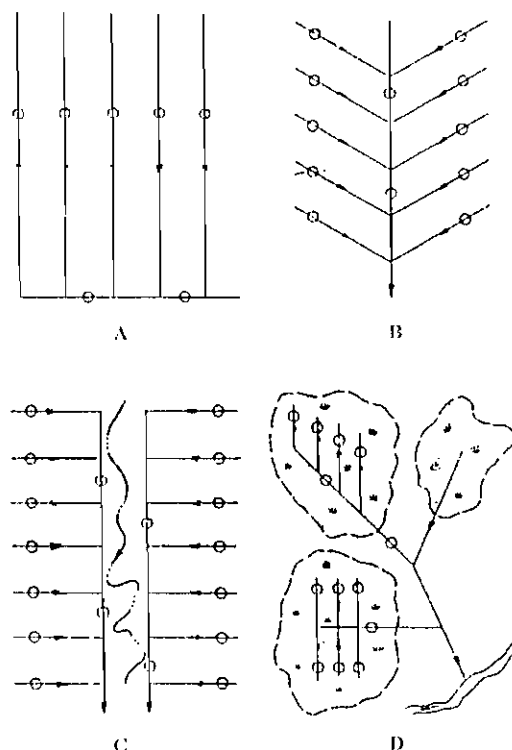


Figura 8. Disposiciones típicas de una red de drenaje (A. Paralelo; B. Espina del pescado; C. Doble paralelo; D. Al azar).

Una vez decidida la ubicación de los laterales o drenes de campo se deberá determinar el largo que ellos tendrán y si descargarán en un colector de zanja o tubo. El primer aspecto depende a su vez de las condiciones topográficas, aptitud, tamaño de la propiedad y caudal de descarga. Por otra parte, la decisión de usar un colector entubado o zanja, dependerá del uso del suelo y caudal de descarga.

5.3.2. Tuberías de drenaje

Anteriormente se indicó que, por lo general, una red de drenaje considera la construcción de drenes entubados (enterrados) como laterales y zanjas abiertas como colectores. Cuando hablamos de materiales para drenes nos estamos refiriendo preferentemente a drenes de tubo y las distintas alternativas existentes en el mercado (figura 9).

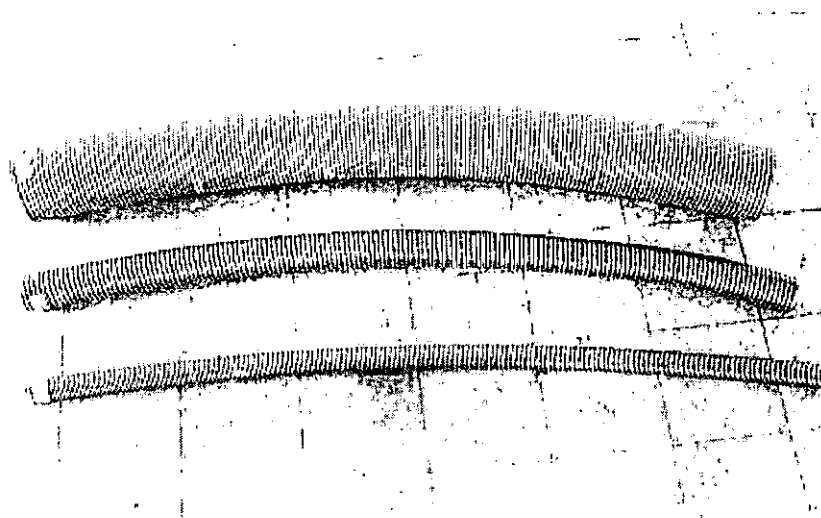


Figura 9. Tuberías de PVC corrugado para drenaje.

En la actualidad las tuberías de plástico son las más frecuentemente utilizadas. La mayor ventaja de las tuberías plásticas frente a las tuberías de cemento y arcilla dice relación con su menor peso por unidad de largo y facilidad de manejo. Esto tiene un impacto importante sobre los costos de transporte e instalación. Una desventaja podría ser eventualmente el costo de la tubería por unidad de largo (en comparación a concreto y arcilla) pero por lo general el costo por unidad de área drenada es menor.

5.3.3. Envolvertes.

Se entiende por envolvente al material que se coloca alrededor de los drenes con el propósito de cumplir una función filtrante, hidráulica o de asentamiento del dren.

La función filtrante se relaciona con prevenir o disminuir el ingreso de partículas al interior de la tubería, con la finalidad de evitar la sedimentación y eventual obstrucción. La función hidráulica se refiere a crear un medio de alta permeabilidad alrededor de la tubería para reducir la resistencia de entrada. La función de asentamiento significa proveer un buen soporte a la tubería para prevenir daño por efecto del peso del suelo. Las primeras dos funciones proveen una protección contra dos principales consecuencias de una tubería mal alineada: obstrucción y alta resistencia al flujo.

En consecuencia, el material envolvente debe ser seleccionado de forma que éste prevenga el ingreso de partículas al interior de la tubería. No obstante, como la función filtrante no es perfecta, la tubería se puede tapar y presentar una mayor resistencia a la entrada del agua.

No todos los suelos requieren material envolvente. En efecto, los suelos de textura fina, con más del 25-30% de arcilla son estructuralmente estables y en ellos por lo general se

puede prescindir del envolvente. Los suelos de textura gruesa, libres de limo y arcilla son casi siempre inestables y precisan material envolvente, siendo en este último caso la función primordial actuar como filtrante y no reducir la resistencia a la entrada del agua.

En los suelos de texturas intermedias es más difícil establecer criterios generales. En los suelos de texturas muy fina (con contenidos de arcilla entre 10 al 30%) la zanja de relleno permanecerá estable y con buena permeabilidad, si la excavación se realizó en seco o, si fue suficientemente compactada, si se trabajó en húmedo. Sin embargo, cuando se instalan drenes en suelos con alto contenido de humedad (cerca de saturación), probablemente se presentarán problemas de sedimentación y alta resistencia de entrada, los que se controlarán empleando envolvente de tipo voluminoso (grava) o de tipo laminar (geotextil).

En general, los suelos de textura más gruesa (con menos del 5% de arcilla y alto contenido de limo) son inestables, tanto en la base de la zanja de excavación como en sus paredes y además pobremente permeables debido a un reordenamiento de las partículas luego de excavada la zanja. En esas condiciones puede ser altamente deseable un material envolvente que rodee plenamente la tubería.

Existe una diversidad de materiales que puede utilizarse como envolventes, partiendo de materiales minerales y orgánicos a materiales sintéticos y fibras minerales. Algunos, se muestran en la figura 10.

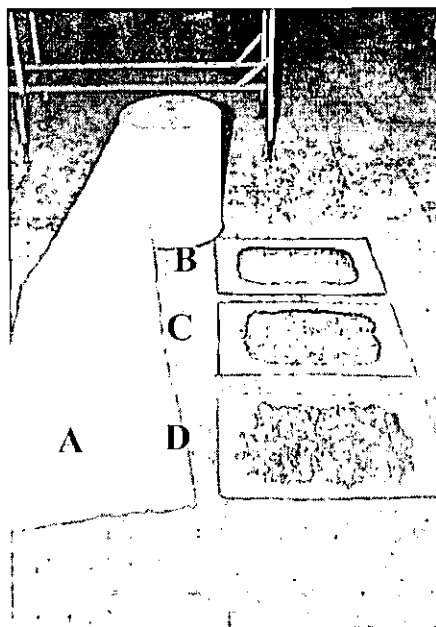


Figura 10. Materiales envolventes para drenes subsuperficiales (A. Geotextil; B. Arena gruesa; C. Grava; D. Chancado).

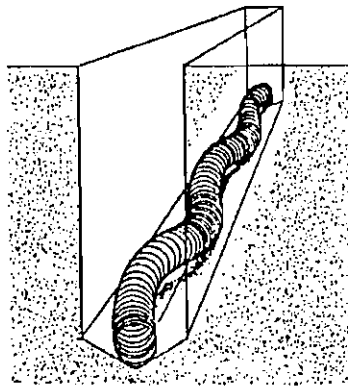
5.3.4. Instalación de los drenes.

La instalación de la red de drenaje pasa por las siguientes etapas:

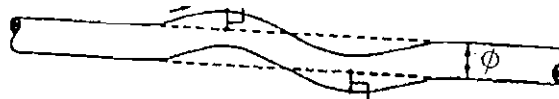
- a) Replanteo. Esto significa llevar al terreno el diseño que se ha realizado en el plano en lo referente a disposición, espaciamiento y pendiente de laterales y colectores.
- b) Excavación de la zanja. Si se trata de un colector tipo zanja o de una zanja de relleno que contendrá un lateral de tubería.
- c) Instalación de la tubería y del material envolvente seleccionado.
- d) Relleno de la zanja.

En países donde la técnica del drenaje es rutinaria y masiva, existen máquinas altamente especializadas para la construcción e instalación simultánea de drenes, del tipo zanjadoras y no zanjadoras. En nuestro país lo usual es primero la construcción de la zanja y luego la instalación de los drenes. La excavación de la zanja puede ser manual o mecanizada. La excavación manual tiene la ventaja que se trata de un trabajo de terminación más fina y delicada, pero resulta menos conveniente debido al aumento del costo de la mano de obra y la baja velocidad de avance. La excavación mecanizada implica usar retroexcavadoras de alto rendimiento, pero con una terminación de baja calidad.

En relación a la instalación de la tubería, es conveniente poner especial cuidado en el alineamiento y en la uniformidad de la pendiente. La figura 11 ilustra ambos problemas los cuales pueden incidir poderosamente en la acumulación de sedimentos.



A



B

Figura 11. Problemas frecuentes que se producen en la instalación de drenes
(A. Alineación; B. Desuniformidad de la pendiente).

REFERENCIAS

- Battilani, A., y F. Ventura. 1997. Influence of water table, irrigation and rootstock on transpiration rate and fruit growth of peach trees. *Acta Horticulture* 2(449):521-528.
- Honorato, R. 1993. Edafología. Universidad de Chile. Santiago.
- Minessy, F.A.; M.A. Barakat and E.M. EL-Azab. 1971. Effect of some soil properties on root and top growth and mineral content of Washington navel orange and Balady mandarin. *Plant and Soil* 34(1):1-15.
- Olien, W.C. 1987. Effect of seasonal soil waterlogging on vegetative growth and fruiting of apple stress. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112(2):209-214.
- Olien, W.C. 1989. Seasonal soil waterlogging influences water relations and leaf nutrient content of bearing apple trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114(4):537-542.
- Oosterbaan, R. J. 1988. Agricultural criteria for subsurface drainage. A Systems analysis. *Agricultural Water Management* 14(1-4):79-90.
- Salgado, L. 2000. Manual de estándares técnicos y económicos para obras de drenaje. Comisión Nacional de Riego. 315p.
- Schwab, G.O.; R.K. Frevert; T.W. Edminster and K.K. Barnes. 1981. Soil and water conservation engineering. John Wiley and Sons N.Y.
- Skaggs, R.W. and J. van Schilfgaarde (ed) 1999. Agricultural drainage. Section 1, Chapter 1. Pp 13-54.
- Wesseling, J. 1974. Crop growth and wet soil. In: J. van Schilfgaarde (ed). Drainage for agriculture American Society of Agronomy N°17, Madison, Wisconsin.
- Woudt, Van't and R. M. Hagan. 1957. Crop response to excessively high soil moisture levels. In: Luthin, J.N.. (ed). Drainage of agricultural lands. American Society of Agronomy N°7, pp. 514-578.