

ESTUDIO DE LA EFICIENCIA DE APLICACION Y EVALUACION DEL RIEGO *POR* GOTEO EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR

Por:
Oscar Antonio Ramírez Cadenillas

Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Ingeniería
de Riego y Drenaje

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL
DE AGUAS Y TIERRAS
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MERIDA - VENEZUELA
1988

www.bdigital.ula.ve

*A la memoria de mi querida madre
A mi esposa por su cariño y aliento
para seguir adelante en mi superación profesional.
A mis pequeños hijos Olguita y Oskuitar con todo el amor de mi corazón.
A mi padre por su perseverancia
A mis hermanos y tíos con el cariño de siempre.
A mis suegros por el apoyo moral
A mis amigos del proyecto REHATI III*

AGRADECIMIENTO

Al Ministerio de Relaciones Exteriores de Venezuela y al Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, CIDIAT, por haberme dado la oportunidad de participar en el curso de postgrado.

Asimismo quisiera expresar mi agradecimiento a los asesores de la Tesis, especialmente a los profesores Luis Rázuri y Carlos Grassi, que con su asesoramiento en la ejecución del trabajo y sugerencias en la estructuración del mismo, hicieron posible que culminara una de mis aspiraciones en el área de tanto interés, como es la Ingeniería de Riego y Drenaje.

A los propietarios de las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra por ofrecer sus campos de cultivo para la realización de las pruebas así como al Ing. José Reyes, administrador de campo por su colaboración en la ejecución del trabajo.

A los Ings. Rodolfo Quiñones y Arturo Barrantes, funcionarios de la hacienda Central La Pastora, por la ayuda desinteresada al ofrecer su laboratorio y equipos para realizar las pruebas de campo.

Al personal administrativo del CIDIAT, por su colaboración prestada en el desarrollo del curso de postgrado.

A la Srta. Elizabeth Flores E., por su gentileza en el mecanografiado de la tesis.

I N D I C E

	Pág.
AGRADECIMIENTO	v
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE SIMBOLOS	xv
RESUMEN	xix
CAPITULO	
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION BIBLIOGRAFICA	3
Generalidades del riego por goteo	3
Metodología de evaluación de campo en riego por goteo . .	4
Lámina promedio de aplicación por planta	5
Volumen de agua aplicado por día	5
Uniformidad de emisión	5
Requerimiento bruto de aplicación	7
Eficiencia de aplicación	9
Pérdida de carga permisible de un sistema de riego	11
Riego por goteo y productividad de la caña	11
Penetración del agua en el suelo	12
Requerimiento de lixiviación	13
Necesidades de agua de los cultivos	14
III. METODOLOGIA Y MATERIALES	17
Descripción general del área de estudio	17
Ubicación, extensión y límites	17
Climatología	17
Temperatura	17
Evaporación	19
Precipitación	19
Balance hídrico	19

	Pág.
BIBLIOGRAFIA	73
A P E N D I C E S	
APENDICE 1. Contenido de humedad volumétrico a diferentes tensiones. Curva de retención de humedad.. . . .	77
APENDICE 2. Pruebas de infiltración	83
APENDICE 3. Pruebas realizadas en las subunidades de riego, referente a caudales y presiones	95
APENDICE 4. Información climatológica. Evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo. Evapotranspiración máxima del cultivo, ETm, diario para el cultivo de la caña de azúcar	105

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Relación de transpiración estacional para regiones áridas y húmedas, con suelos de diferentes texturas y cultivos de diferente profundidad radicular	10
2 Valores de Kc correspondiente a la caña de azúcar	16
3 Valores de evaporación probable a nivel de 70% ($P_x < P_c$) correspondiente a un promedio de los años 1973-1982	19
4 Valores de precipitación probable a nivel de 70% ($P_x \geq P_c$) correspondiente al período 1973-1982	21
5 Balance hídrico de la zona de estudio	21
6 Valores de salinidad del suelo	24
7 Propiedades físicas de los suelos	25
8 Contenido de humedad en base a volumen a las tensiones de 1/3 y 15 atmósferas	26
9 Ecuaciones de las pruebas de infiltración	26
10 Resultados del análisis de agua con fines de riego	27
11 Valores de edad de germinación - porcentaje de sombreado	42
12 Ancho de humedecimiento en el lateral de riego	43
13 Caudal y volumen de abastecimiento a los tablones evaluados	44
14 Relación de presiones en los filtros	45
15 Datos de caudal - presión del tablón 23 B	47
16 Caudales por unidad de longitud	47
17 Caudales por unidad de longitud relacionando el volumen aplicado y el tiempo de riego	48
18 Valores del factor de corrección de descarga, FRE	48

LISTA DE TABLAS (cont.)

	Pág.
19	Valores de salinidad del agua de riego 50
20	Valores de uniformidad de emisión de la múltiple, UEm, y uniformidad del sistema, UE 51
21	Valores de evapotranspiración máxima, ETm, de la caña de azúcar para una frecuencia de 3 días y promedio diario 52
22	Evapotranspiración máxima diaria (mm/día) para di ferentes períodos de desarrollo vegetativo 53
23	Valores del umbral de riego empleados en el momen to de la aplicación de agua 54
24	Valores de requerimiento de lavado, RL 54
25	Valores de eficiencia de aplicación 56
26	Rendimiento del cultivo de la caña de azúcar, Tn/Ha 57
27	Promedio de pérdidas de carga por ubicación de la teral 63
28	Pérdida de carga promedio de la múltiple 64
29	Estimación de las pérdidas de carga de las múlti ples empleando la ecuación de Darcy-Weisbach (Ra zuri, 1987) 64
30	Determinación de las presiones en una subunidad promedio con el fin de mejorar la uniformidad de emisión a nivel de terreno 66
31	Comparación de los rendimientos obtenidos en la caña de azúcar por los diferentes métodos de riego en Tn/Ha 67

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Ubicación del área de estudio	18
2	Evaporación probable a nivel de 70% ($E_{vx} < E_{vc}$), correspondiente al período de 1973-1982 de las estaciones Los Aranguez, Central La Pastora y los estimados para la Hda. Sicarigua	20
3	Representación gráfica del balance hídrico	22
4	Plano textural del área de estudio	23
5	Perfiles típicos del área de estudio	24
6	Distribución de los sistemas de riego en las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra	28
7	Esquema del sistema de riego.	30
8	Funcionamiento de los filtros de arena y de malla	31
9	Sección de la tubería doble ducto	32
10	Distribución de los lugares de prueba	34
11	Ubicación de los manómetros en los filtros de arena	35
12	Ubicación de los manómetros en la entrada (a) y en el extremo final del lateral (b)	35
13	Excavación de zanjas de prueba (a) y líneas de riego con 4 orificios de emisión (b)	37
14	Obtención del volumen de agua en el lateral	38
15	Caja de control de caudal en l/s y registro de volumen en m ³	38
16	Separación entre plantas y laterales	41
17	Relación edad de cultivo - porcentaje de sombreado	42
18	Sección transversal a la línea de riego en los suelos de textura fina	44

LISTA DE FIGURAS (cont.)

	Pág.
19 Relación entre caudal promedio y carga promedio en los diferentes tablonos	49
20 Relación edad del cultivo - tiempo de riego para una eficiencia de 90%	57
21 Sección transversal típica en los suelos finos	61
22 Distribución de presiones en la subunidad promedio	66

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Definición
Aw	Area mojada por planta
a	Coeficiente o índice de área foliar medio del ciclo
ECe	Conductividad eléctrica del extracto de saturación
C	Proporción de evaporación del suelo desnudo
c	Factor de corrección de la ecuación de Penman
db	Lámina bruta de aplicación
dd	Lámina de agua derivada
di	Lámina requerida por lixiviación
dn	Lámina neta de riego
d'n	Lámina consumida en el riego anterior
\bar{d}_w	Lámina promedio aplicada por riego
\bar{d}	Lámina promedio aplicada por riego para el área total
ECr	Conductividad eléctrica del agua de riego
Efr	Eficiencia parcelaria o de aplicación
Et	Evapotranspiración real del cultivo en particular
Etm	Evapotranspiración máxima del cultivo
Eto	Evapotranspiración del cultivo estándar o de referencia
ea	Presión de vapor a saturación a la temperatura media del aire
ed	Presión real media de vapor del aire
e	Número de emisores por planta
Fr	Frecuencia o intervalo de riego de diseño
FRE	Factor reductor de la uniformidad del sistema
f(u)	Función del viento
Ha	Hectáreas
ha	Carga hidráulica o de presión promedio
hn	Carga hidráulica mínima del sistema
h	Carga hidráulica
Icum	Infiltración acumulada
Ib	Infiltración básica
I	Velocidad de infiltración

LISTA DE SIMBOLOS (Cont.)

Símbolo	Definición
K	Coeficiente que agrupa las características del cultivo, humedad del suelo y otros factores agroclimáticos.
Kc	Coeficiente de cultivo.
Kh	Coeficiente del nivel de humedad del suelo
KPa	Kilo pascal
Ks	Coeficiente del suelo y otros factores agroclimáticos
l/s	Litros por segundo
l/h	Litros por hora
l/h-m	Litros por hora por metro lineal
MAD	Déficit manejable permitido de humedad
MaxCEe	Conductividad eléctrica máxima del extracto de saturación
mínimo LMPE	Presión mínima de los laterales de mínima presión de entrada
m ³	Metros cúbicos
m ³ /h	Metro cúbicos por hora
ml	Mililitros
mmhos/cm	Milimhos por centímetro
Pe	Precipitación efectiva
Ps	Porcentaje de sombreado
Promedio LMPE	Promedio de los laterales de mínima presión de entrada
PSI	Libra por pulgada cuadrada
qa	Descarga promedio de emisión del sistema
qn	Descarga promedio de emisión del cuarto inferior de datos
RL	Requerimiento de lavado
Rn	Radiación neta
SMD	Déficit de humedad en el suelo
Sp	Separación entre planta
Sr	Separación entre hileras
Tr	Relación de transpiración
tc	Duración del ciclo vegetativo del cultivo
Tn/Ha	Toneladas por hectárea
tr	Tiempo de aplicación de riego

LISTA DE SIMBOLOS (Cont.)

Símbolo	Definición
t	Lapso transcurrido desde el inicio del ciclo
t _b	Tiempo en que ocurre la infiltración básica
UE	Uniformidad de emisión total o del sistema
UE'	Uniformidad de emisión de campo
UE _m	Uniformidad de emisión de la múltiple del área de prueba
\bar{V}	Volumen promedio aplicado por día para cada planta o árbol
\bar{V}'	Volumen por día
W	Factor de ponderación para efectos de la radiación a diferentes temperaturas y altitudes
x	Exponente de descarga
ΔH_m	Pérdida de carga permisible en la terciaria
ΔH_s	Diferencia máxima de presiones, toleradas en la unidad
Δh_a	Pérdida de carga permisible en el lateral

www.bdigital.ula.ve

RESUMEN

El presente estudio se realizó en el área sembrada de caña de azúcar de las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra en el Estado Lara, donde actualmente existen sistemas de riego por goteo con mangueras de doble ducto enterradas a 20 cm de la superficie del suelo.

El estudio se llevó a cabo en su condición de funcionamiento normal, en el gran cultivo en 9 subunidades distribuidas en diferentes lugares. La metodología empleada fue la desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, que consiste en seleccionar una subunidad de riego y medir las presiones en la múltiple a la entrada y en el extremo distal. Luego se seleccionan 4 laterales ubicados al inicio, a 1/3, 2/3 y cerca del extremo final de la múltiple, y en cada uno de ellos se eligen 4 puntos donde se realizan excavaciones de 2,40 m de largo y 0,20 de profundidad, donde se recolecta el agua que erogan 4 orificios, en un tiempo de 2 minutos. Además se realizan las mediciones de las presiones en la entrada y extremo final de los laterales.

Los resultados obtenidos respecto de la uniformidad de emisión de los sistemas pueden calificarse de regular a pobre, debido a la variación de presiones que presenta cada subunidad y que influye en los caudales erogados por los orificios de los laterales.

La eficiencia de aplicación encontrada es variable y está en función de la edad del cultivo, siendo una de las causas de dicha variación el tiempo de riego que es igual para todos los sistemas, mientras que se encuentran tablones con plantaciones de diferente período vegetativo, debido a que no es uniforme la cosecha en cada sistema.

Los rendimientos obtenidos en riego por goteo son mayores con respecto a los obtenidos con otros métodos de aplicación de agua en las referidas haciendas, en las condiciones de operación de los mismos, en el gran cultivo.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO I

INTRODUCCION

En las dos últimas décadas se han desarrollado nuevas tecnologías para afrontar el desafío que implica el desarrollo agrícola, siendo el riego por goteo o gota a gota una de las innovaciones en el campo de la ingeniería de riego que ha contribuido más significativamente a la producción de alimentos con un sustancial ahorro de agua.

El riego por goteo se emplea en varios países de Latinoamérica, entre ellos Venezuela, con resultados aparentemente satisfactorios. Actualmente se encuentran funcionando sistemas de riego por goteo en el cultivo de la caña de azúcar en el Estado Lara, donde el recurso agua es de vital importancia, ya que las necesidades hídricas de los cultivos son satisfechas con la explotación del agua subterránea, que es escasa y cara. Es, por lo tanto, necesario realizar una evaluación de tal sistema de riego y determinar la eficiencia de aplicación para comprobar los diseños propuestos, el funcionamiento y la adaptación del mismo al cultivo de la caña de azúcar.

El objetivo general que se persigue en el presente trabajo es:

- Análisis y evaluación del funcionamiento hidráulico de los equipos de riego por goteo, instalados en cultivos de caña de azúcar en las haciendas mencionadas.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Determinación de las láminas de reposición de agua al cultivo.
- Determinación de la eficiencia de aplicación y distribución del agua, considerando el bulbo de humedecimiento y la profundidad de raíces.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO II

REVISION BIBLIOGRAFICA

Generalidades del riego por goteo

En los sistemas de riego por goteo el agua es conducida por tubos hasta el punto de aplicación en las plantas, lo que significa que es un riego localizado. El agua a aplicar se puede controlar y distribuir con precisión, existiendo toda una metodología para el diseño y dimensionamiento del sistema, que fue propuesto por Keller y Karmeli (1975) y Goldberg, Gornat y Rimón (1976).

Los componentes básicos de un sistema de riego por goteo son: bomba, filtros, línea de distribución, emisor y otros controles, y equipos de monitoreo (Rázuri, 1987).

La aplicación de agua se realiza mediante un emisor que está diseñado para disipar presión y descargar un caudal pequeño y uniforme, o gotear el agua con un caudal constante, o bien que no varíe significativamente, debido a diferencias pequeñas en la carga de presiones (Keller, 1978).

La obstrucción de los goteros causa distribución desigual del agua a lo largo de los laterales, lo cual puede dañar seriamente los cultivos, si los mismos permanecen obstruidos por un tiempo largo, antes que se puedan limpiar o reparar (Keller, 1983). Es, por tanto, indispensable tener en cuenta la calidad del agua y proceder al filtrado a fin de contrarrestar efectos negativos para la necesaria uniformidad de emisión.

Se recomienda usar filtro de malla a continuación de los filtros de grava, a menos que el filtro esté provisto con su propio filtro de malla para atrapar cualquier partícula que pudiera escapar durante el lavado invertido, cuando se procede a la limpieza de los filtros (Keller, 1983).

En la práctica se recomienda que la caída de presión en el filtro de a-

rena no sea superior a 70 k Pa (10 PSI) según Keller (1983).

Metodología de evaluación de campo en riego por goteo

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS,1984) presenta una metodología para la evaluación de campo, donde el éxito de un sistema de riego por goteo requiere que la cantidad de agua aplicada y su frecuencia depende de su adecuado diseño. Para determinar la cantidad de agua a aplicar deberá conocerse la uniformidad de emisión de campo, UE' , la cual, desafortunadamente cambia con el tiempo, por lo que el funcionamiento del sistema deberá ser evaluado periódicamente.

Los datos necesarios para la evaluación de un sistema de riego por goteo son:

1. Duración, frecuencia y secuencia de operación de un ciclo de riego normal.
2. Déficit de humedad en el suelo, SMD, y déficit manejable permitido, MAD, en el volumen humedecido.
3. Tasa de descarga en los puntos de emisión y las presiones para varias emisiones sucesivas en el sistema.
4. Cambios en la tasa de descarga de las emisiones, después de la limpieza u otras operaciones.
5. Porcentaje de volumen de suelo mojado.
6. Espaciamiento y tamaño de los árboles u otras plantas existentes.
7. Localización de los puntos de emisión con respecto a árboles frutales, vid u otras plantas, y grado de uniformidad del espaciamiento de los puntos de emisión.

8. Pérdida de carga en los filtros.

Lámina promedio de aplicación por planta

La lámina promedio aplicada por planta se estima a partir del déficit manejable permitido, MAD, con la ecuación siguiente (SCS, 1984):

$$\bar{d}_w = \frac{e \cdot q_a \cdot t_r}{A_w} \quad (2.1)$$

donde:

\bar{d}_w es la lámina promedio aplicada por riego

e es el número de emisores por planta

q_a es la descarga promedio del punto de emisión de la subunidad

t_r es el tiempo de aplicación por riego

A_w es el área mojada por planta

La lámina promedio aplicada por riego para el área de tierra asignada a cada planta, \bar{d} , se calcula sustituyendo en la ecuación (2.1) el valor de A_w por el espaciamiento entre plantas e hileras ($S_p \cdot S_r$).

Volumen de agua aplicado por día

El volumen promedio aplicado por día para cada planta o árbol, \bar{v} , se calcula con la ecuación (SCS, 1984):

$$\bar{v} = \frac{e \cdot q_a \cdot t_r}{F_r} \quad (2.2)$$

donde:

F_r es la frecuencia de riego de diseño

Uniformidad de emisión

La uniformidad de emisión medida en el campo, UE, es necesario para determinar la eficiencia de operación del sistema y para estimar los requerimien-

tos brutos de agua del mismo.

La uniformidad de emisión es una función de las variaciones de presión a través del sistema y la calidad de fabricación de las tuberías.

Cuando los datos de descarga del emisor son de un área servida por una múltiple sencilla, la uniformidad de emisión de la múltiple del área de prueba, UEm, se calcula así (SCS, 1984):

$$UEm = \frac{q_n}{q_a} \times 100 \quad (2.3)$$

donde:

q_n es el caudal promedio del 25% de los emisores que han registrado los valores menores

q_a es el caudal promedio de todos los emisores

Algunos sistemas de riego por goteo utilizan emisores autocompensantes de presiones o tienen reguladores de presión o gasto a la entrada de cada lateral. Sin embargo, muchos sistemas están provistos con un medio para regular o controlar la presión solamente a la entrada de la tubería terciaria o múltiple. Si la presión de entrada a la múltiple varía más que un determinado porcentaje, debido a diseño y/o manejo, la uniformidad de emisión del sistema, UE, será menor que la UEm para la múltiple de prueba.

El factor reductor de la eficiencia, FRE, se calcula con los valores obtenidos de las presiones medidas en los laterales que se ubican en el extremo distal de las múltiples que funcionan simultáneamente (SCS, 1984):

$$FRE = \frac{(\text{Promedio LMPE}) + (1,5 \text{ M\u00ednimo LMPE})}{2,5 (\text{Promedio LMPE})} \quad (2.4)$$

donde:

Promedio LMPE es el promedio de las presiones individuales, LMPE, de los laterales de una múltiple.

Mínimo LMPE es el lateral de menor presión de entrada, de la múltiple

El factor reductor de la eficiencia, FRE, también puede estimarse más precisamente por la ecuación (SCS, 1984):

$$FRE = \left(\frac{\text{Mínimo LMPE}}{\text{Promedio LMPE}} \right)^x \quad (2.5)$$

En los sistemas donde las variaciones de presión son relativamente pequeñas y el exponente de descarga del emisor $x = 0,5$, que corresponde a la ecuación $q = k h^x$, los dos métodos para calcular FRE dan los mismos resultados, pero para variaciones de presión mayores que 0,2 veces la carga de presión media del emisor, ha, o el valor de $0,6 < x < 0,4$, la diferencia puede ser significativa.

El factor reductor de la eficiencia, FRE, es aproximadamente igual a la relación entre la descarga promedio de los puntos de emisión en el área servida por la múltiple con la mínima LMPE y la descarga promedio de los puntos de emisión del sistema; en consecuencia la uniformidad del sistema, UE, puede aproximarse por la ecuación:

$$UE = FRE UEm \quad (2.6)$$

En general los valores de UE de sistemas que han sido operados por una o más estaciones son los siguientes:

Mayor del 90%: excelente; entre 80 y 90%: bueno; 70 a 80%: regular; y menores que el 70%: pobre.

Requerimiento bruto de aplicación

Como en el riego por goteo se humedece sólo una porción del volumen de suelo, el déficit de humedad deberá reponerse frecuentemente. Por esta razón es difícil estimarlo, debido a que algunas regiones de la masa húmeda de la zo-

na radicular muchas veces permanecen cerca de capacidad de campo, incluso con el intervalo entre riego de algunos días. Por esta razón, el déficit de humedad del suelo, SMD, deberá estimarse de datos a partir de tanques de evaporación u otros procedimientos. Como tales estimaciones están sujetas a error y debido a que no hay una forma cierta para computar el aporte de la freática, la determinación del déficit de humedad en el suelo está sujeta a cierta imprecisión.

La lámina bruta, db, se obtiene por las ecuaciones siguientes (SCS,1984):

$$db = \frac{dn \text{ Tr}}{EU} \quad (2.7)$$

$$\text{si } \text{Tr} \geq 1/(1,0 - \text{RL}) \text{ ó } \text{RL} \geq 0,1$$

donde:

Tr es la relación de transpiración entre el agua necesaria para el cultivo y la aplicada

dn es la lámina neta

ó

$$db = \frac{dn}{EU(1,0 - \text{RL})} \quad (2.8)$$

$$\text{si } \text{Tr} < 1/(1 - \text{RL}) \text{ ó } \text{RL} > 0,1$$

donde:

RL es el requerimiento de lavado

Para estimar la lámina neta para riego se procede de la siguiente manera:

1. Estimar la lámina de agua, dn', que puede ser consumida por el cultivo desde el riego anterior en su máximo crecimiento. Esta puede estimarse por técnicas estándar basadas en datos del tanque de evaporación u otros procedimientos.

2. Restarle la lámina de precipitación efectiva, Pe .
3. Calcular dn por la ecuación siguiente (SCS, 1984):

$$dn = (dn' - Pe) \left[\frac{Ps}{100} + 0,15 (1 - \frac{Ps}{100}) \right] \quad (2.9)$$

donde Ps es el porcentaje de suelo sombreado por el cultivo, con el valor de db , el volumen bruto promedio por riego de agua requerida por la planta (\bar{v}) resulta por la ecuación:

$$\bar{v} = db \cdot Sp \cdot Sr \quad (2.10)$$

Entonces, el volumen promedio aplicado por planta y por día, \bar{v}' , será:

$$\bar{v}' = \frac{e \cdot q_a \cdot tr}{Sp \cdot Sr} \quad (2.11)$$

Si $\bar{v} < \bar{v}'$, el campo está sobre-irrigado y si $\bar{v} > \bar{v}'$, está subirrigado.

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, 1984) presenta algunos valores de Tr en función del clima, profundidades y textura del suelo, Tabla 1.

Eficiencia de aplicación

El concepto llamado eficiencia de aplicación, EP_m , es utilizado para estimar cuán bien trabaja un sistema. Esta es función del pico de relación de transpiración, Tr , los requerimientos de lavado, RL , y la uniformidad de emisión de campo, UE . Cuando las pérdidas inevitables de agua son mayores que los requerimientos de lavado, $Tr > 1/(1 - RL)$, la EP_m puede calcularse así (SCS, 1984):

$$EP_m = \frac{UE}{Tr(1 - RL)} \quad (2.12)$$

y cuando $Tr < 1/(1 - RL)$

Tabla 1. Relación de transpiración estacional para regiones áridas y húmedas, con suelos de diferentes texturas y cultivos de diferente profundidad radicular.

Clima y profundidad radicular (m)	Textura del Suelo			
	Muy gruesa	Gruesa	Media	Fina
Arido				
> 0.75	1.15	1.10	1.05	1.05
0.75 - 1.50	1.10	1.10	1.05	1.00
> 1.50	1.05	1.05	1.00	1.00
Húmedo				
> 0.75	1.45	1.25	1.15	1.10
0.75 - 1.50	1.25	1.20	1.10	1.05
> 1.50	1.20	1.10	1.05	1.00
EPm = UE				(2.13)

Merrian y Keller (1978), citados por Hillel (1982), recomiendan tomar 8 mediciones de presión como mínimo y 32 volúmenes de descarga en 16 emisiones sencillas y, para emisiones en línea, usar una canaleta de 1 m de largo para recolectar el volumen de descarga en 16 lugares diferentes, y estimar la uniformidad de los emisores de campo mediante la ecuación siguiente, que equivale a la ecuación (2.3):

$$EUf = \frac{\bar{q}_{25}}{\bar{q}} \quad (2.14)$$

donde:

\bar{q}_{25} es el promedio del 25% de datos que han arrojado los menores valores de descarga

\bar{q} es el promedio de todos los valores de descarga

Keller y Karmeli (1975) proponen la determinación de los siguientes parámetros para evaluar el riego por goteo: Eficiencia de aplicación, uniformidad de emisión absoluta, relación de descarga de manufactura ajustada y descarga de goteros.

Pérdida de carga permisible de un sistema de riego

Rázuri (1987) menciona que la diferencia máxima de presiones, tolerada en la unidad de riego ΔH_s , puede calcularse con fines de diseño por la siguiente ecuación:

$$\Delta H_s = 2,5 (h_a - h_n) \quad (2.15)$$

donde:

h_a es la carga de operación de la unidad de riego en m, medida a 0,4 de la longitud del lateral

h_n es la carga para el caudal mínimo en el punto distal de la unidad de riego.

Calculando ΔH_s , este valor constituye la tolerancia que deberá repartirse entre los laterales y la tubería terciaria. Si el terreno no tiene pendiente o ésta es pequeña, se reparte de manera que:

$$\Delta h_a \approx \Delta H_m = H_s/2 \quad (2.16)$$

donde:

Δh_a es la pérdida de carga permisible en el lateral (m)

ΔH_m es la pérdida de carga permisible en la terciaria (m)

Riego por goteo y productividad de la caña

El grado de aprovechamiento del agua del suelo por la planta depende del estado energético del agua entre el suelo y la planta. Cuando mayor sea el estado energético del agua del suelo, menor será su grado de disponibilidad (Vásquez et al., 1979).

Husz (1968), después de largos estudios llevados a cabo en el norte del Perú, concluye que el umbral de riego en el cultivo de la caña de azúcar entre 2,5 y 3 bar, es el valor límite para el cual las pérdidas de producción son importantes. Esto indica que la succión del agua del suelo, para la producción óptima de caña de azúcar, debe estar comprendida entre 0,33 y 3,00 bares. A partir de 2 ó 3 bares, hasta los 15 bares, el nivel de producción es reducido y, más allá de este rango, se producen daños significativos al cultivo, llegando incluso a producirse la muerte de la planta.

Robinson (1963) determinó experimentalmente que la caña de azúcar con una fuerza de succión media de 2 bares sigue todavía absorbiendo agua, pero que su tasa de crecimiento disminuye marcadamente.

Goldberg (1976) menciona que la distribución del agua en el riego por goteo es muy importante desde el punto de vista de técnica de riego y en la determinación de los límites de la zona de raíces y concentración de agua y sales. Por eso es importante el ajuste del ancho y de la profundidad de humedecimiento en la zona de raíces, ya que es una característica a tener en cuenta cuando los cultivos comienzan a crecer y, lo más notable en riego por goteo es la entrada de agua en el suelo desde un punto de salida que luego se expande en todas las direcciones.

La evaporación, transpiración, la descarga de los goteros y el número de goteros y el espaciamiento entre ellos, son factores responsables en la determinación del área de humedecimiento de los goteros (Goldberg, 1976).

Penetración del agua en el suelo

La velocidad de infiltración o su sinónimo: velocidad de entrada, se pueden 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 (Grassi, 1987).

Se han propuesto varias ecuaciones empíricas para expresar la velocidad

de infiltración como una función del tiempo, que pueda ser representada por una curva de forma hiperbólica. La ecuación de Kostiaikov expresa la velocidad de infiltración en un punto:

$$I = a t^b \quad (2.17)$$

donde:

- I es la velocidad de infiltración ($L T^{-1}$) en $mm \text{ min}^{-1}$ ó $mm \text{ h}^{-1}$
- t es el tiempo de infiltración (T) en min o en h
- a es un coeficiente, el cual representa la velocidad de infiltración a $t = 1,0$ expresado en $mm \text{ min}^{-(1+b)}$ ó $mm \text{ h}^{-(1+b)}$
- b es un exponente sin dimensión, siempre es negativo con valores entre 0 y - 1,0.

Integrando la ecuación (2.17) entre los límites $t = 0$ y $t = t$, se obtiene la infiltración acumulada.

$$I_{cum} = \frac{a}{b+1} t^{(b+1)} \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) también puede ser representada así:

$$I_{cum} = A t^B \quad (2.19)$$

La ecuación de Kostiaikov ha sido 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.

Requerimiento de lixiviación

El riego por goteo, debido a la aplicación continua de agua, se ha usado precisamente para "convivir" con el problema de salinidad, ya que no se produce la lixiviación de las sales, pues sólo se mueven hacia el frente de humedad del suelo húmedo. Tales efectos se observan claramente en zonas áridas, donde la

ausencia de lluvia impide que se produzca lixiviación y el cambio de ubicación de las sales en el perfil.

Para el riego por aspersión y por goteo, con alta frecuencia el requerimiento de lixiviación se determina por la siguiente expresión (Ayers y Westcot, 1976):

$$RL = \frac{ECr}{2(\text{máx } ECe)} \quad (2.20)$$

donde:

ECr es la conductividad eléctrica del agua de riego

máx ECe es la conductividad eléctrica máxima del extracto de saturación.

Necesidades de agua de los cultivos

En razón del elevado nivel de humedad en el suelo en riego por goteo, durante todo el ciclo vegetativo de la caña, la evaporación es la máxima, Etm. No rero (1976) define la evapotranspiración máxima, ETm, como la cantidad de agua que el cultivo consume en un momento determinado de su ciclo vegetativo, en condiciones óptimas de humedad y sin limitación alguna en cuanto a suelo y otros factores.

$$Et = ETo Kc \quad (2.21)$$

donde:

ETo es la evaporación del cultivo de referencia

Kc es el coeficiente de cultivo.

La American Society of Civil Engineers (1963) ubica a la ecuación de Penman como el procedimiento más exacto para un amplio rango de condiciones meteorológicas, lo que coincide con la conclusión a que arriba el estudio de la FAO (Doorembos y Pruitt, 1976).

$$Eto = c | W Rn + (1 - W) f(u)(ea - ed) | \quad (2.22)$$

donde:

- c factor de corrección
- W factor de ponderación relacionado con la temperatura y altitud
- Rn radiación neta
- f(u) valores de la función del viento
- ea,ed presión de vapor.

Norero (1976) produjo una ecuación para evapotranspiración máxima, Etm, para un cultivo sin limitación alguna de humedad, la que se expresa así:

$$Etm = |C + a(t/tc)^2 (1 - t/tc)|Ev \quad (2.23)$$

donde:

- C es la proporción de evaporación del suelo desnudo
- a es el coeficiente o índice de área foliar medio del ciclo
- t es el lapso transcurrido desde el inicio del ciclo en días
- tc es la duración del ciclo vegetativo del cultivo en días.

Doorembos y Pruitt (1976) presentan valores de Kc correspondientes a la caña de azúcar, Tabla 2.

Jensen (1967) presentó un procedimiento sintético, expeditivo, para obtener la eficiencia parcelaria, Efr, el cual consiste en medir sólo el agua de rizada, dd, y estimar las láminas evapotranspiradas, Et, la requerida para lixiviación de sales, dL, y la precipitación efectiva, Pe, para el período correspondiente, tal que:

$$Efr = \frac{Et + dL - Pe}{dd} \quad (2.24)$$

Medidas de la eficiencia de riego realizadas en diferentes parcelas de un área irrigada arrojan resultados que permiten obtener valores para un sector o la totalidad de un sistema, a fin de iniciar programas de mejoramiento de esta práctica, si los resultados indican que ello es pertinente.

Tabla 2. Valores de Kc correspondientes a la caña de azúcar (*).

Edad del cultivo		Fases de Crecimiento	RH min > 70%		HR min < 70%	
12 meses	24 meses		Viento de ligeros a moderados	Vientos fuertes	Vientos de ligeros a moderados	Vientos fuertes
0 - 1	0 - 2.5	de la planta ción a un 0.25 de la cubierta com- pleta.	.55	.6	.4	.45
1 - 2	2.5-3.5	de 0.25 a 0.5 de la cubier- ta completa.	.8	.85	.74	.8
2-2.5	3.5-4.5	de 0.5 a 0.75 de la cubier- ta completa.	.9	.95	.95	1.0
2.5-4	4.5-6	de 0.75 a la cubierta com- pleta.	1.0	1.1	1.1	1.2
4-10	6-17	utilización máxima	1.05	1.15	1.25	1.3
10-11	17-22	senescencia precoz.	.8	.85	.95	1.05
11-12	22-24	maduración	.6	.65	.7	.75

(*) Doorembos y Pruitt (1976)

A base de una zonificación previa, basada en criterios topográficos, edáficos, agrícolas e hidráulicos, es posible llevar a cabo un programa de medición de la eficiencia parcelaria y consecuentemente de las pérdidas y desperdicios de agua. Los resultados, ya procesados y graficados, constituyen elementos esenciales específicos de mejoramiento del riego.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOLOGIA

Descripción general del área de estudio

Ubicación, extensión y límites

El área de estudio se encuentra localizada en el Estado Lara, Distrito Torres, Municipio Trinidad Samuel, en las coordenadas geográficas 9°57' latitud norte y 70°07' de longitud oeste, Figura 1. El área dedicada al cultivo de la caña de azúcar y regada por goteo es de 230,5 Ha, de un total de 416 Ha, comprendiendo sectores de las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra. La zona se encuentra delimitada por terrenos de dichas haciendas, dedicados a la ganadería.

El lugar de estudio es parte del valle del río Sicarigua de la cuenca del río Bucares, afluente del río Morere, perteneciente a la hoya hidrográfica del río Tocuyo.

Climatología

En razón de la escasez de agua, las haciendas antes mencionadas tuvieron la necesidad de realizar un estudio de requerimiento de riego para la caña de azúcar, con fines de formulación de programas de operación. En este estudio se considera como representativa del área de estación meteorológica que se encuentra ubicada en la hacienda Central La Pastora, localizada a 559 m.s.n.m., siendo sus coordenadas geográficas 9°49' de latitud norte y 70°10' latitud oeste.

Temperatura

En la zona de estudio la temperatura máxima varía entre 30,5° y 37,5°C y la temperatura mínima entre 16° y 21,5°C, presentándose durante el año dos períodos bien marcados de mayor oscilación que son los meses de Enero a Marzo y Julio a Agosto.

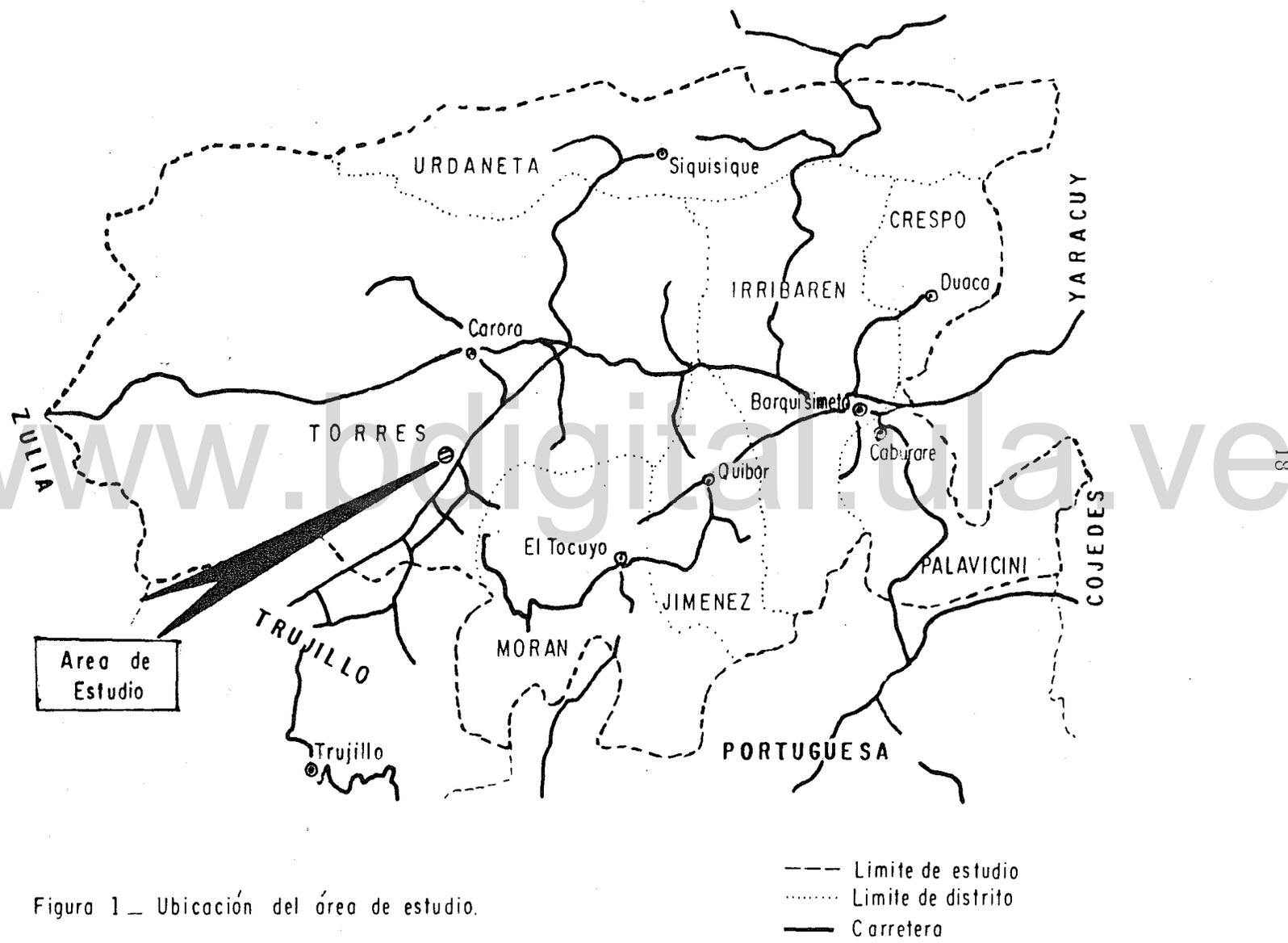


Figura 1 – Ubicación del área de estudio.

Evaporación de la tina standar tipo A

Las haciendas Sicarigua y Ciénaga de Cabra se ubican entre las estaciones meteorológicas Las Aránguez y Central La Pastora. Ambas estaciones presentan diferencias en su información. Para el estudio se tomó el promedio de las estaciones antes mencionadas, en las cuales la mayor demanda evaporativa ocurre en los meses de Marzo, Julio y Agosto, con una evaporación de 6,9 a 7,7 mm/día y la de menor demanda en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre, con 5,5 a 5,9 mm/día. Los datos respectivos se presentan en la Tabla 3 y en la Figura 2, expresados como valores probables al nivel del 70%.

Tabla 3. Valores de evaporación probable a nivel de 70% ($P_x \leq P_c$) correspondientes a un promedio de los años 1973 - 1982.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
C. La Pastora	155,8	157,4	183,0	172,4	164,1	162,6	186,3	177,5	172,8	154,9	152,9	150,7	1990,3
Los Aranguez	227,1	234,9	268,0	223,2	223,0	273,0	317,0	292,3	233,4	194,9	173,8	194,2	2854,8
Hda. Sicarigua	191,0	197,9	223,2	198,2	192,0	214,8	251,3	232,4	195,2	176,6	163,6	170,2	2406,4

Precipitación

Se analizaron los datos de las estaciones pluviométricas Lencho, Lister, Oficina Sicarigua y Sicarigua MARNR, localizadas en el área de estudio. Se calcularon los valores de precipitación a nivel de 70% de probabilidad, observándose dos meses de mayor precipitación, que son Abril y Octubre, con variaciones de 63,2 a 93,7 mm para el primer mes, y de 72,0 a 90,5 mm para el segundo mes. La precipitación mínima se presenta en el mes de Julio, con una variación de 1,4 a 13,6 mm. Los datos de precipitación se presentan en la Tabla 4, indicando que son de escasa significación frente a la demanda evaporativa (Tabla 3).

Balance hídrico

A fin de calificar las características climáticas de la zona de estudio,

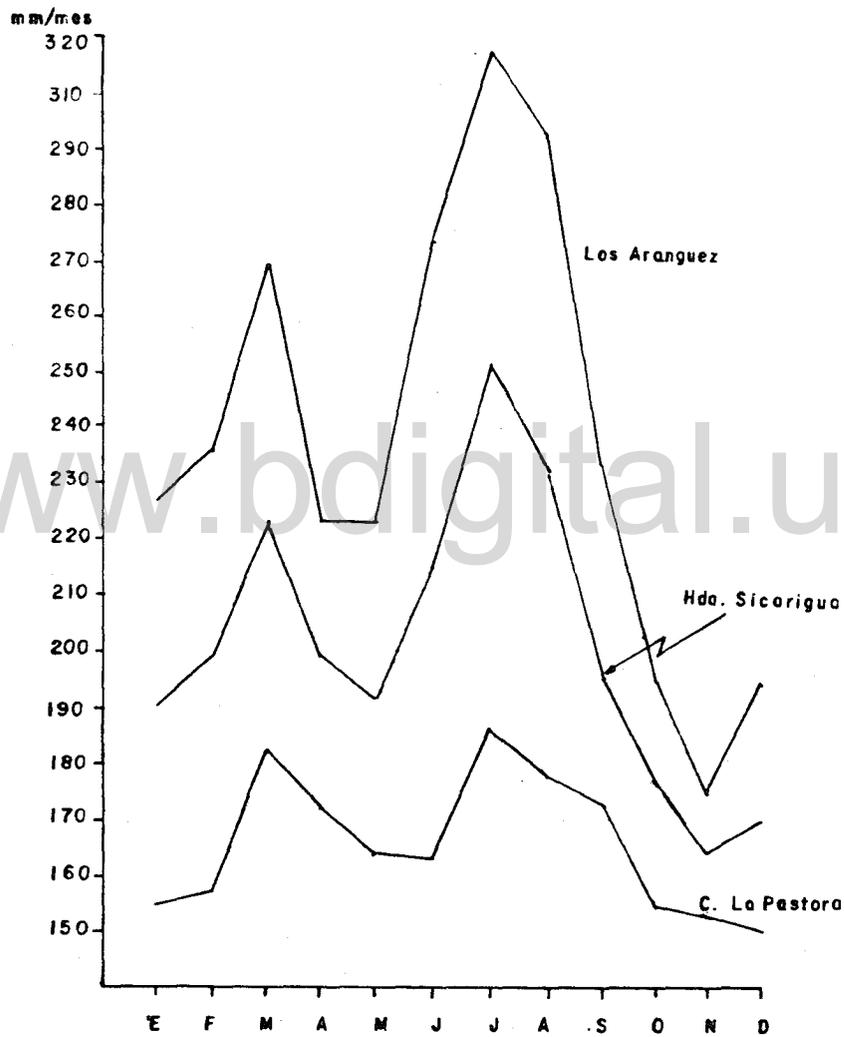


Figura 2. Evaporación probable a nivel de 70% ($Ev_x \leq Ev.c$), correspondiente al período de 1973 - 1982 de las estaciones Los Aranguez, C. La Pastora y los estimados para la Hda. Sicarigua.

Tabla 4. Valores de precipitación probable a nivel de 70% ($P_x \geq P_c$) correspondiente al período 1973 - 1982.

Estación	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Lencho	15,3	11,0	24,0	77,8	48,4	27,1	1,4	20,6	61,6	88,2	54,5	13,8	444,6
Lister	24,9	21,5	30,2	93,7	60,4	40,2	9,6	38,9	74,9	90,5	78,7	25,1	588,3
Ofic-Sicarigua	16,9	15,0	26,5	65,8	51,3	15,1	13,6	41,2	76,1	72,0	72,1	32,5	498,1
Represa	17,6	17,8	10,4	63,2	37,2	19,8	6,2	30,0	63,7	82,0	65,6	23,3	444,8
Sicarigua	14,7	12,5	20,3	67,1	47,5	21,6	8,6	32,1	76,4	79,4	71,3	27,1	478,6

se realizó un balance hídrico del suelo en equilibrio con el clima. Para ello se empleó la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o , basada en la evaporación de la tina y un coeficiente de ajuste de 0,80 (Doorembos y Pruitt, 1976), la precipitación del mes, P . La Tabla 5 muestra el resultado del balance hídrico y la Figura 3 la representación de ET_o y P , mes por mes. Ambos ponen en evidencia que la zona presenta un déficit significativo de agua durante todo el año, que obliga recurrir al riego para una producción agrícola segura y rentable.

Tabla 5. Balance hídrico de la zona de estudio

M E S E S	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Evaporación (mm)	191,0	197,9	223,2	198,2	192,0	214,8	251,3	232,4	195,2	176,6	163,6	170,2
ET_o^* (mm)	152,8	158,3	178,6	158,6	153,6	171,7	201,0	185,9	156,2	141,3	130,9	136,2
Precipitación (mm)	17,9	15,6	22,3	73,5	49,0	24,8	7,9	32,6	70,5	82,4	68,4	24,4
Almacenamiento (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Exceso (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Déficit (mm)	134,9	142,7	156,3	85,1	104,6	147,0	193,1	153,3	85,7	58,9	62,5	111,8

* $ET_o = 0,8 Ev$

Suelos

Textura y salinidad

La zona de estudio se caracteriza por presentar dos grupos texturales

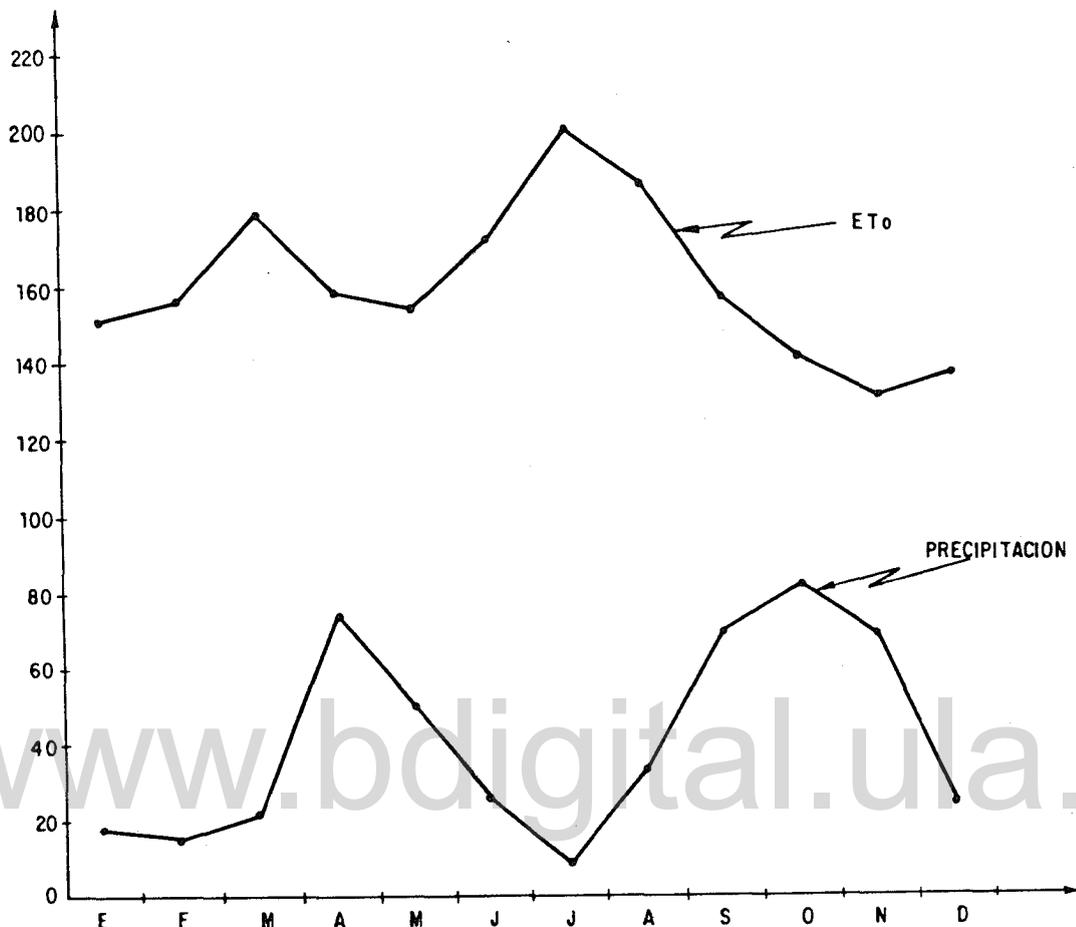


Figura 3. Representación gráfica del balance hídrico

bien definidos, dominando las texturas arcillosas, franco-arcillosas y franco-arcillo-arenosas, entre las finas, y a las texturas franca y areno-francosa entre las medias. La Figura 4 representa el plano textural del área de estudio.

El perfil típico de los suelos finos se caracteriza por la presencia de los primeros 100 cm de una capa de suelo de textura arcillosa, limitada por una capa impermeable. En los suelos de textura media, los primeros 20 cm corresponden a un franco-arcillo-arenoso, seguida de una textura franca hasta 120 cm y un franco-arcillo-arenoso hasta los 150 cm. Los respectivos perfiles se esquematizan en la Figura 5.

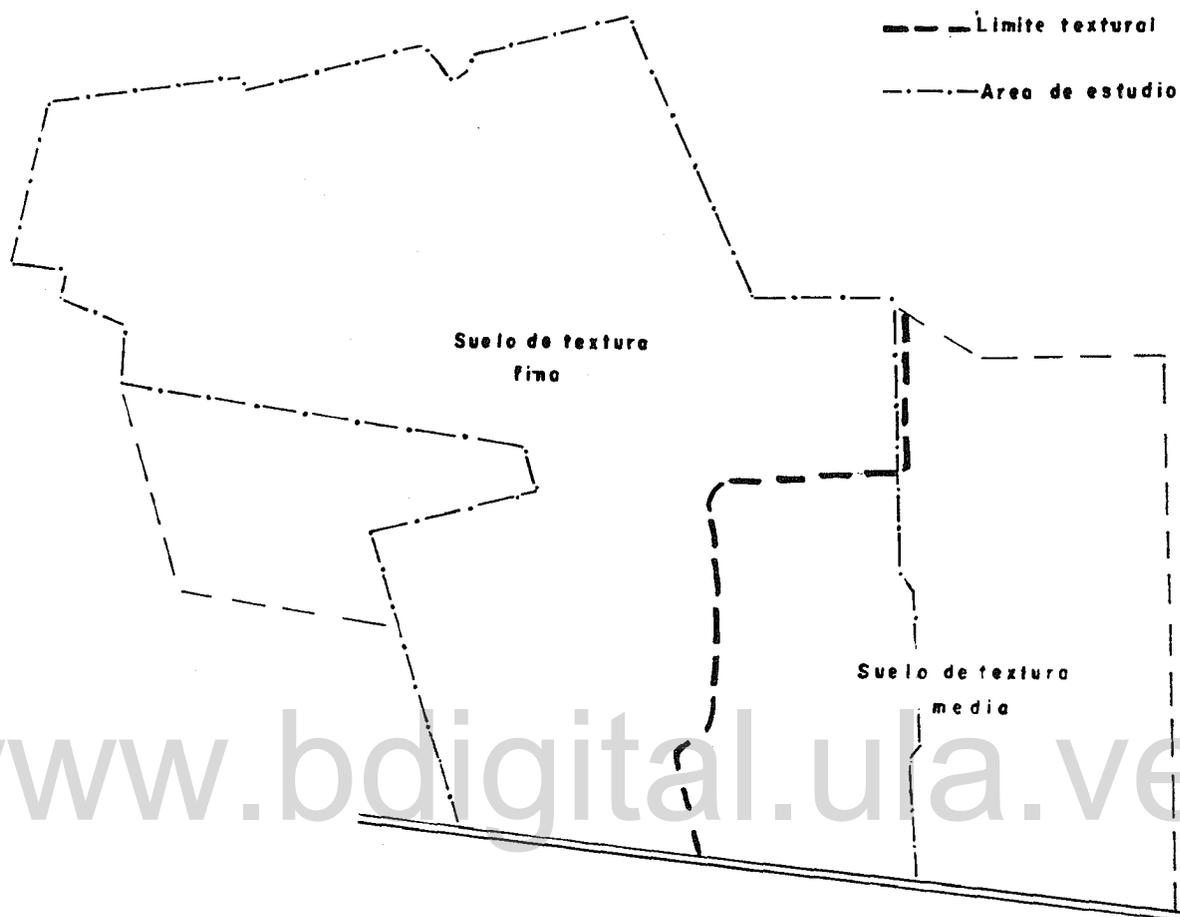


Figura 4. Plano textural del área de estudio

Para determinar la salinidad de los suelos se tomaron muestras a diferentes profundidades, cubriendo la totalidad de las raíces. Los valores obtenidos son bastante bajos, como se muestra en la Tabla 6, siendo el mayor de ellos 0,2 mmhos/cm.

Densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente, ρ_a , se empleó el muestreador Uhland, que consiste en introducir a presión, en el perfil del suelo, un anillo de volumen conocido. Los valores obtenidos no corresponden a los que caracterizan a los suelos de textura fina; esto puede ser debido a la compactación, producto de la intervención de prácticas culturales mecanizadas, o al ti-

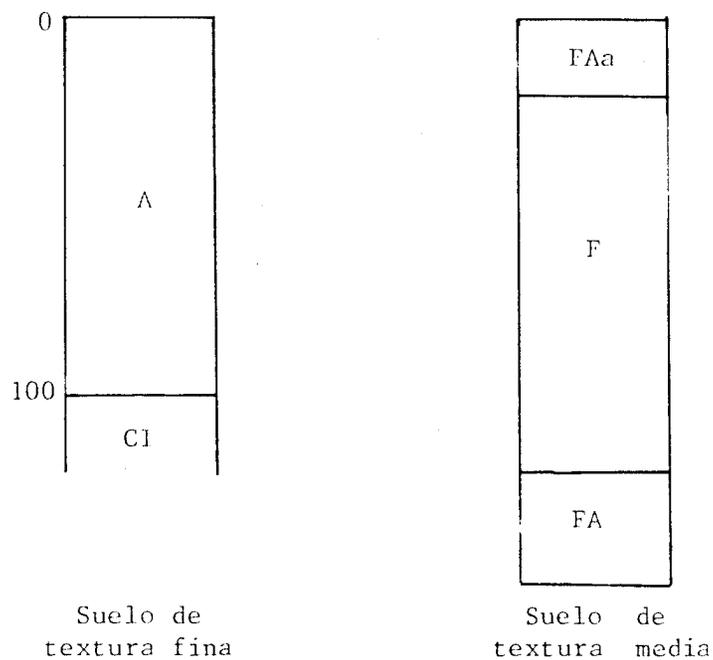


Figura 5. perfiles típicos del área de estudio

Tabla 6. Valores de salinidad del suelo

Muestra	Textura	Profundidad cm	CEX10 ³ 1:2
28 C de C	A	0 - 30	0,20
	A	30 - 60	0,19
6 C de C	FAa	0 - 30	0,17
	F	30 - 60	0,12
	F	60 - 90	0,12
44A C de C	A	0 - 30	0,14
	A	30 - 60	0,11
	A	60 - 90	0,09
23 B	aF	0 - 60	0,13
	aF	60 - 90	0,12

po de arcillas predominante. Además, se determinó el porcentaje de aire en los poros, cuyos valores se presentan en la Tabla 7, donde f es la porosidad total, V_f el volumen total de poros, V_a volumen de agua, V_s volumen de sólidos, θ contenido de humedad en base a volumen, θ_s contenido de humedad a saturación, f_a volumen de aire y e_v relación de vacíos.

Tabla 7. Propiedades físicas de los suelos.

Muestra	Textura	Prof. cm	f_a pr cm^{-1}	f %	V_f cm^3	V_G cm^3	V_s cm^3	θ %	θ_s %	f_a %	e_v
41 C de C	A	0-30	1,59	40,0	54,9	42,5	82,5	30,9	77	23	0,67
	A	30-60	1,60	39,6	54,4	51,5	83,0	37,5	95	5	0,66
29 C de C	A	0-30	1,39	47,5	65,3	60,9	72,2	44,4	93	7	0,90
	A	30-60	1,48	44,2	60,7	56,5	80,9	41,1	93	7	0,75
	A	60-90	1,62	38,9	53,5	52,9	83,9	38,4	99	1	0,64
23 B SIC	aF	0-60	1,49	43,8	60,2	47,6	77,2	34,6	79	21	0,78
	aF	60-90	1,66	37,4	51,4	43,6	93,8	31,8	85	15	0,55

Retención de humedad

La retención de humedad a diferentes presiones de desplazamiento de aire se determinó en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Los Andes. Se utilizó la olla de presión, obteniéndose los contenidos de agua en base a volumen, a tensiones de 1/10, 1/3, 1, 3, 7, 10 y 15 atmósferas. Los resultados de estas pruebas, así como las respectivas curvas de retención de humedad, se encuentran en el Apéndice 1. Un resumen de estos resultados se presenta en la Tabla 8, que incluye los puntos de equilibrio de humedad, utilizados comúnmente en las prácticas y cálculos de riego. El contenido de humedad a 1/3 de atmósfera es elevado si se considera que el mismo equivale a la capacidad de campo. Es posible que la medición directa, en el campo, de este parámetro se aproxime más a la succión de 0,4 ó 0,5 atmósferas.

Infiltración

Para determinar la infiltración de la zona de estudio se empleó el método de los cilindros infiltrómetros, debido a la facilidad de uso en el cam-

Tabla 8. Contenido de humedad en base a volumen a las tensiones de 1/3 y 15 atmósferas.

Muestra	Textura	Profundidad cm	Tensiones		H.D.*
			1/3	15	
41 C de C	A	0 - 30	35,4	19,7	15,7
	A	30 - 60	38,0	20,1	17,9
29B C de C	A	0 - 30	48,7	29,6	19,1
	A	30 - 60	51,4	29,9	21,5
	A	60 - 90	48,8	28,5	20,3
23B SIC	aF	0 - 60	42,2	22,9	19,3
	aF	60 - 90	41,5	20,9	20,8

* Humedad disponible

po. Es de hacer notar que se hace necesario desarrollar una metodología para la determinación de la infiltración cuando se aplica agua por goteo, donde todo el proceso de dinámica del agua en el suelo ocurre en suelo no saturado.

Las ecuaciones obtenidas a partir de los datos de campo se presentan en la Tabla 9. En ellos se observa que los valores obtenidos para los suelos finos son altos, debido a que éstos presentan agrietamiento superficial, en oportunidad del riego. En el Apéndice 2 se presentan las pruebas realizadas en el área de estudio.

Tabla 9. Ecuaciones de las pruebas de infiltración

Ubicación	Textura	I _{cum} cm	I cm/hr
29B C de C	A	$0,42t^{0,85}$	$21,4t^{-0,15}$
		$0,30t^{0,84}$	$15,12t^{-0,16}$
75A C de C	A	$0,42t^{0,83}$	$20,41t^{-0,17}$
		$0,39t^{0,81}$	$18,92t^{-0,19}$
23B SIC	aF	$3,4t^{0,55}$	$112,2t^{-0,45}$
		$3,2t^{0,55}$	$105t^{-0,45}$

Riego y Drenaje

El área cultivada de caña de azúcar de las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra es 416,07 Ha, de las cuales se riegan por gravedad 185,57 Ha y por goteo 230,50 Ha. El agua para riego es obtenida del acuífero subterráneo, de la formación del glacis de explayamiento del pleistoceno superior u holoceno. Estimaciones hechas por FUDECO (1979) consideran que el almacenamiento anual de agua en el valle Sicarigua-Bucare's es $94 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Para determinar la calidad de las aguas se realizó un análisis de muestras que dieron como resultado una clasificación C2S1, por lo cual estas aguas pueden utilizarse para el riego de la mayoría de los cultivos, en suelos con drenaje moderado. Los datos de estos análisis se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de análisis de agua con fines de riego

Fuente de agua: Pozos 4,5 y 7 CDC, Hda. Sicarigua
Estado: Lara Distrito: Torres

Fecha: 27 abril 1988
Interesado: Hda. Sicarigua

Nº Lab.	pH	CE x 10 ⁶	Cationes meq/litro					Aniones meq/litro					RAS	PSI	Clasif.
			Ca ++	Mg ++	Na +	K +	Total	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Total			
54	7,7	484	3,92	0,59	0,23	0,04	4,78	2,94	0,39	1,22	4,55	0,15	0,0	C ₂ S ₁	
55	7,8	453	2,94	0,98	0,27	0,04	4,23	3,40	0,34	0,63	4,37	0,19	0,0	C ₂ S ₁	
56	7,8	453	3,33	0,59	0,59	0,27	4,23	3,54	0,39	0,63	4,56	0,19	0,0	C ₂ S ₁	

El área sembrada de caña, aparentemente no presenta problemas de drenaje, pero es necesario realizar un estudio al respecto, ya que en la zona existen capas restrictivas al movimiento de agua que causan efectos negativos en la producción, debido al exceso de humedad en la capa radical.

Configuración del sistema de riego

El área de estudio presenta 7 sistemas de riego por goteo; 3 corresponden a Sicarigua y 4 a Ciénega de Cabra, tal como se indica en la Figura 6. En cada

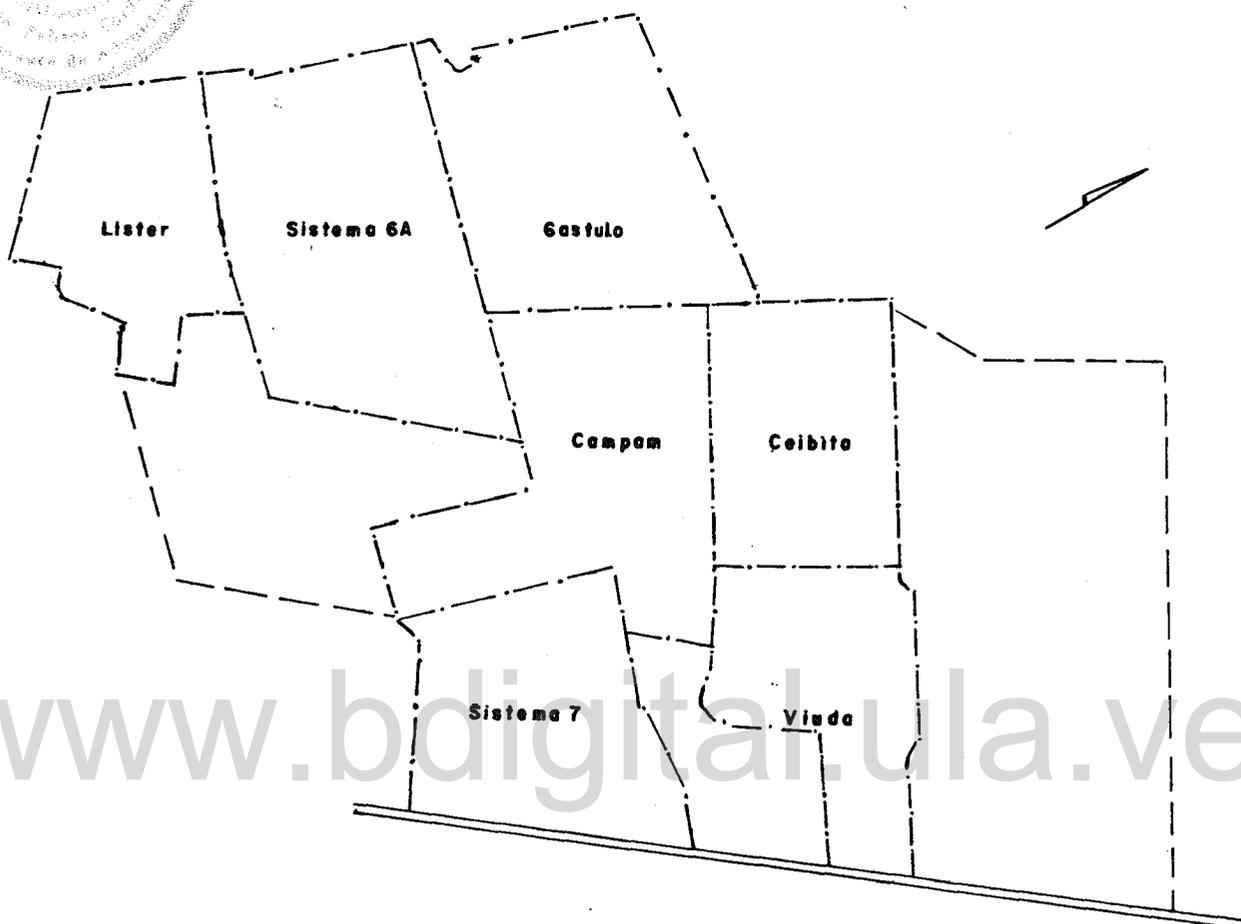


Figura 6. Distribución de los sistemas de riego en las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra

uno de los sistemas el agua es obtenida de los acuíferos subterráneos mediante una bomba y motor eléctrico. Esta agua pasa directamente a la unidad de control, la cual está equipada con filtros de arena de tanque vertical con una capacidad de filtrado de 10-24 l/s y filtros de malla con una capacidad de 20 l/s. Estos filtros tienen manómetros para controlar la presión a la entrada y salida; entre los filtros se localiza el tanque fertilizador que tiene una capacidad de 265 l, el inyector químico con un gasto máximo de 0,02 l/s y el medidor de agua donde se registra el caudal en l/s y el volumen en m^3 .

El agua se conduce hacia los tablones por una red de tuberías principales, secundarias y múltiples, las cuales son de cloruro de polivinilo (PVC) e instaladas a una profundidad de 1 m por debajo de la superficie del suelo. Cada

unidad o tablón está independizado por medio de una tanquilla, donde se localizan las llaves de paso, reguladores de presión, ventosas y llaves de purga de la múltiple. En las Figuras 7 y 8 se esquematiza el sistema de riego y el funcionamiento de los filtros, respectivamente.

La aplicación de agua al campo se realiza por los conductos laterales, que son tuberías de polietileno de baja densidad (PEBD), tipo doble ducto, de 15 mm de diámetro en la conducción y 2,5 mm de diámetro en la cámara externa, Figura 9. La tubería doble ducto presenta orificios de emisión externo cada 60 cm y orificios de emisión interno cada 240 cm, es decir 4 orificios externos por 1 orificio interno.

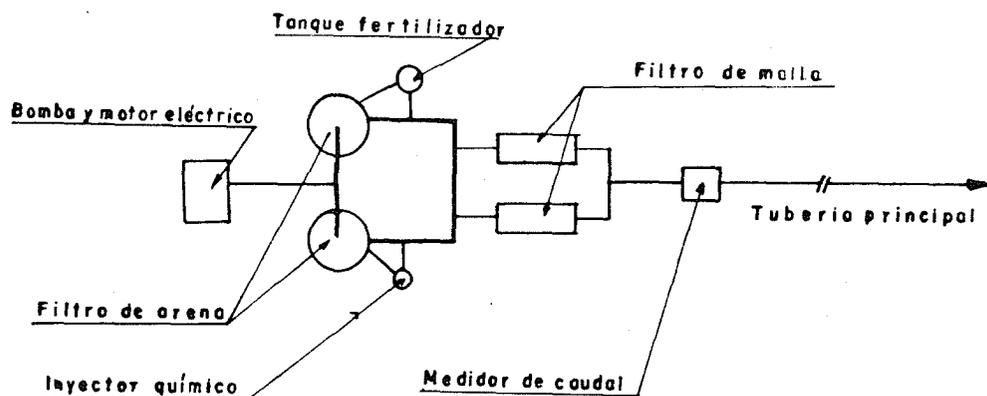
Los laterales se encuentran uniformemente espaciados cada 3 m y a 20 cm debajo de la superficie del terreno, tomando agua de la tubería terciaria por medio de un elevador.

La diferencia con los sistemas tradicionales, donde las tuberías se encuentran instaladas en la superficie del terreno, se debe a las características particulares del cultivo en la zona, donde las actividades culturales son mecanizadas. Además, previo a la cosecha se realiza la quema de las plantaciones, lo que provocaría la destrucción de las mangueras. Por otra parte, con la tubería enterrada, hay ahorro de mano de obra, tanto para recoger como para tender la manguera antes y después de dicha actividad.

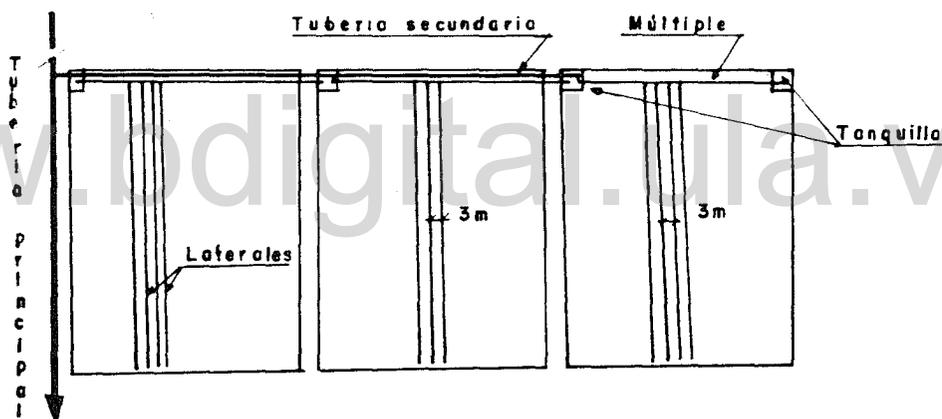
Procedimiento de campo

Cada una de las pruebas comprendió los siguientes pasos y mediciones :

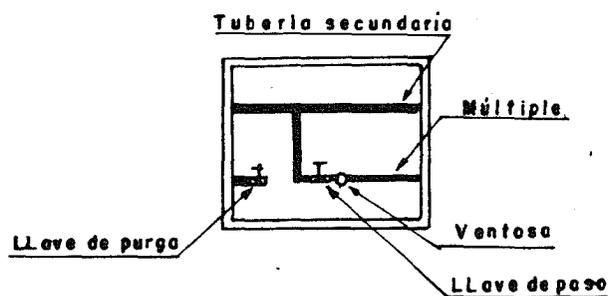
- Selección de sitios de prueba
- Presión a la entrada y salida de los filtros
- Selección de 4 laterales dentro de la múltiple de prueba
- Presión a la entrada y en el extremo final de cada uno de los laterales de prueba



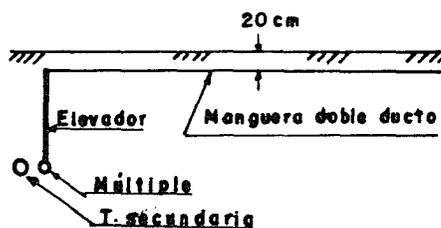
a) Unidad de control



b) Unidad de riego



c) Tanquilla



d) Conexión del lateral con la múltiple

Figura 7. Esquema del sistema de riego.

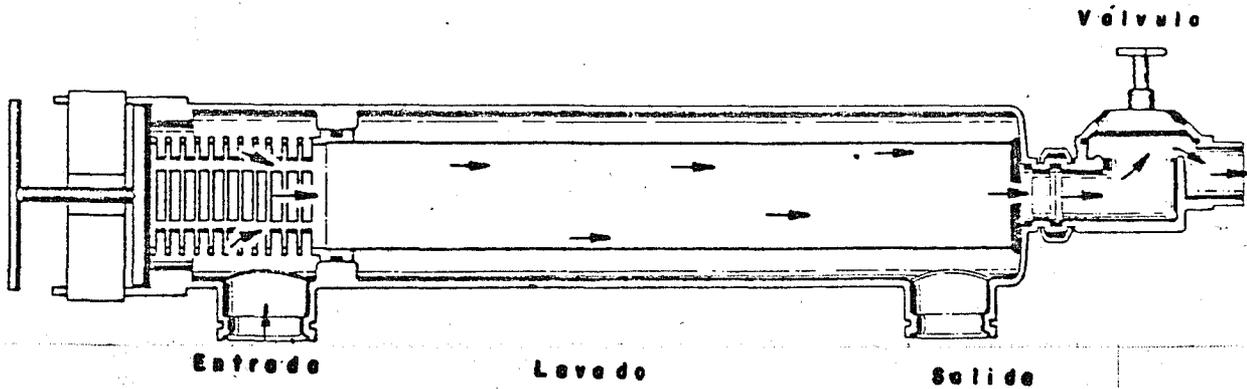
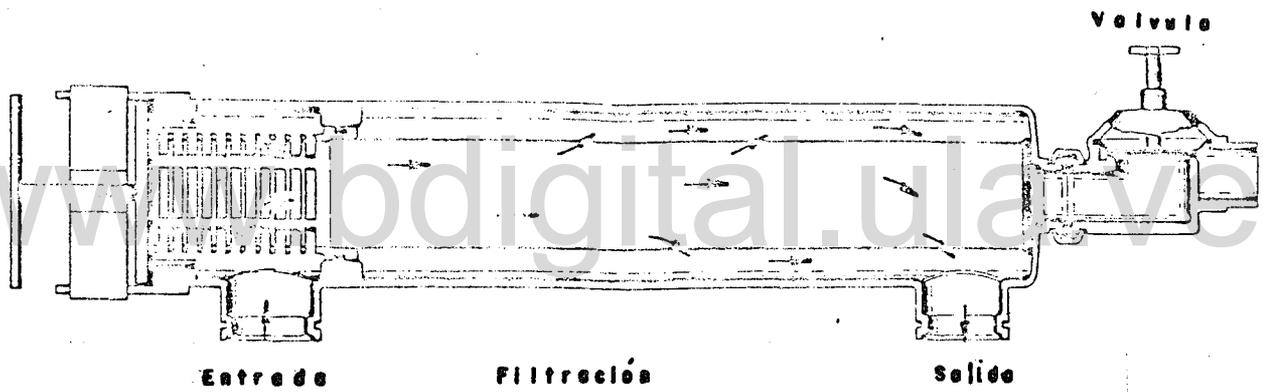
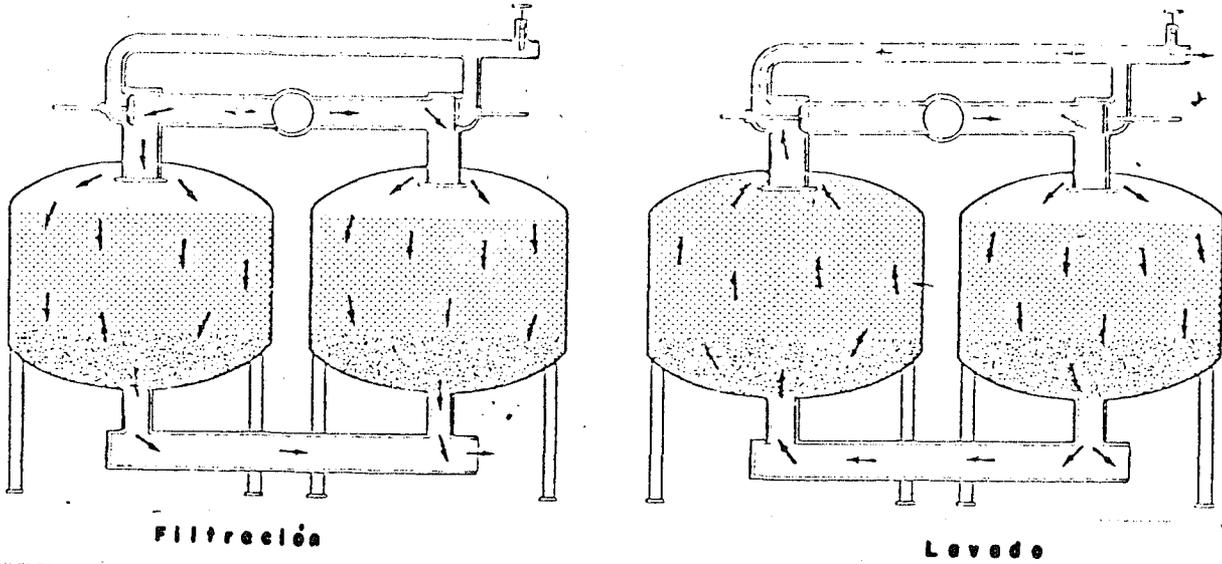


Figura 8. Funcionamiento de los filtros de arena de malla.

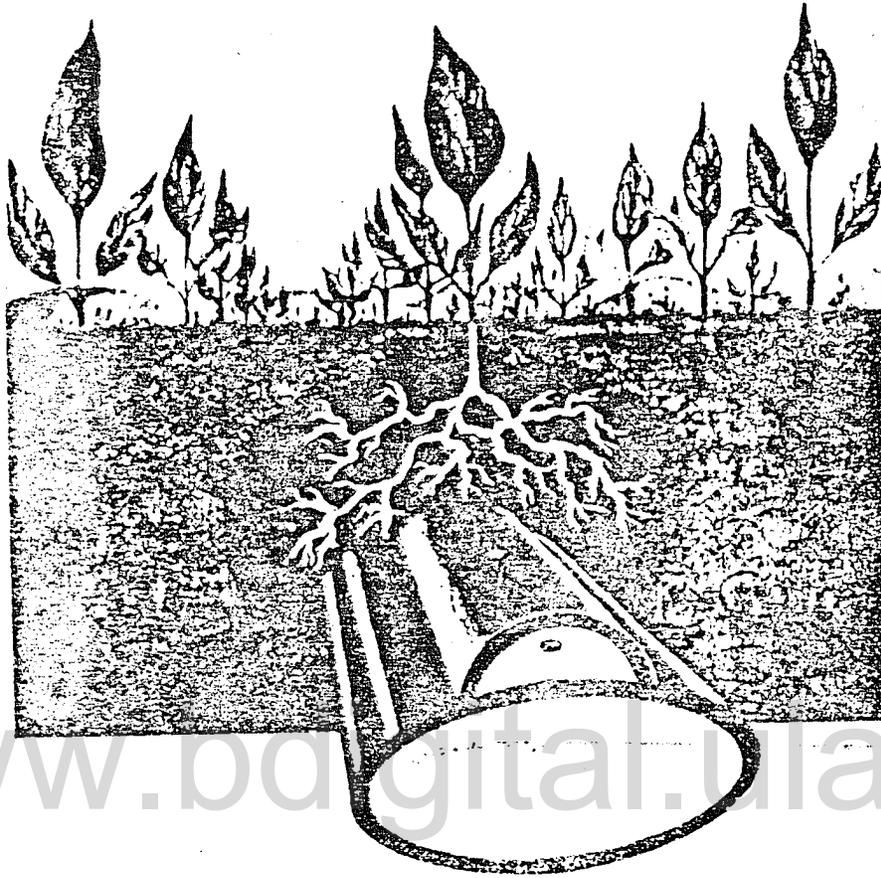


Figura 9. Sección de la tubería doble ducto

- Caudales a la entrada, a 1/3, 2/3 y cerca del extremo final de los laterales seleccionados
- Características hidráulicas de la manguera doble ducto
- Caudal del sistema y el número de múltiples o subunidades en funcionamiento
- Determinación del ancho de humedecimiento de los laterales seleccionados
- Presión del lateral ubicado en el extremo distal de cada múltiple en funcionamiento.

La secuencia de las diferentes etapas que comprendió cada prueba fue la siguiente:

1. Selección de los sitios de prueba en el área de estudio. A tal fin se escogieron sistemas que tenían un funcionamiento normal, en vista de que existen casos con deficiencia en su operación. La distribución de los lugares

elegidos se hizo considerando la edad del cultivo, el tipo de suelo y ubicados de manera que cubrieran el área de estudio. En la Figura 10 se representa dicha disposición.

2. Para la medición de la presión a la entrada y salida de los filtros se utilizaron los manómetros, cuyas lecturas se expresan en PSI. La finalidad de estas mediciones fue determinar la caída de presión y comprobar el funcionamiento del filtro. En la Figura 11 se presenta la ubicación de los manómetros en los filtros.

3. La selección de los laterales dentro de la múltiple de prueba se hizo de conformidad a la metodología de trabajo del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, esto es, los laterales que se encuentran ubicados al inicio, a 1/3, 2/3 y en el extremo final de la múltiple.

4. La medición de las presiones a la entrada y en el extremo final de cada uno de los laterales se realizó empleando 2 manómetros, instalados uno entre el elevador y la manguera doble ducto y el otro en el extremo final. Las lecturas de las presiones para cada uno de los laterales se registraron al inicio de la prueba y al término de la misma. En la Figura 12 se presenta la ubicación de los manómetros en el lateral.

5. De acuerdo a la metodología de trabajo los caudales se midieron a la entrada, a 1/3, 2/3 y cerca del extremo final de cada lateral, para lo cual se realizaron excavaciones de 240 m de largo y 0,20 - 0,30 m de profundidad. El método de medición del caudal fue el volumétrico, que consiste en recoger el volumen de agua que erogan 4 orificios en el tiempo de 2 mi-

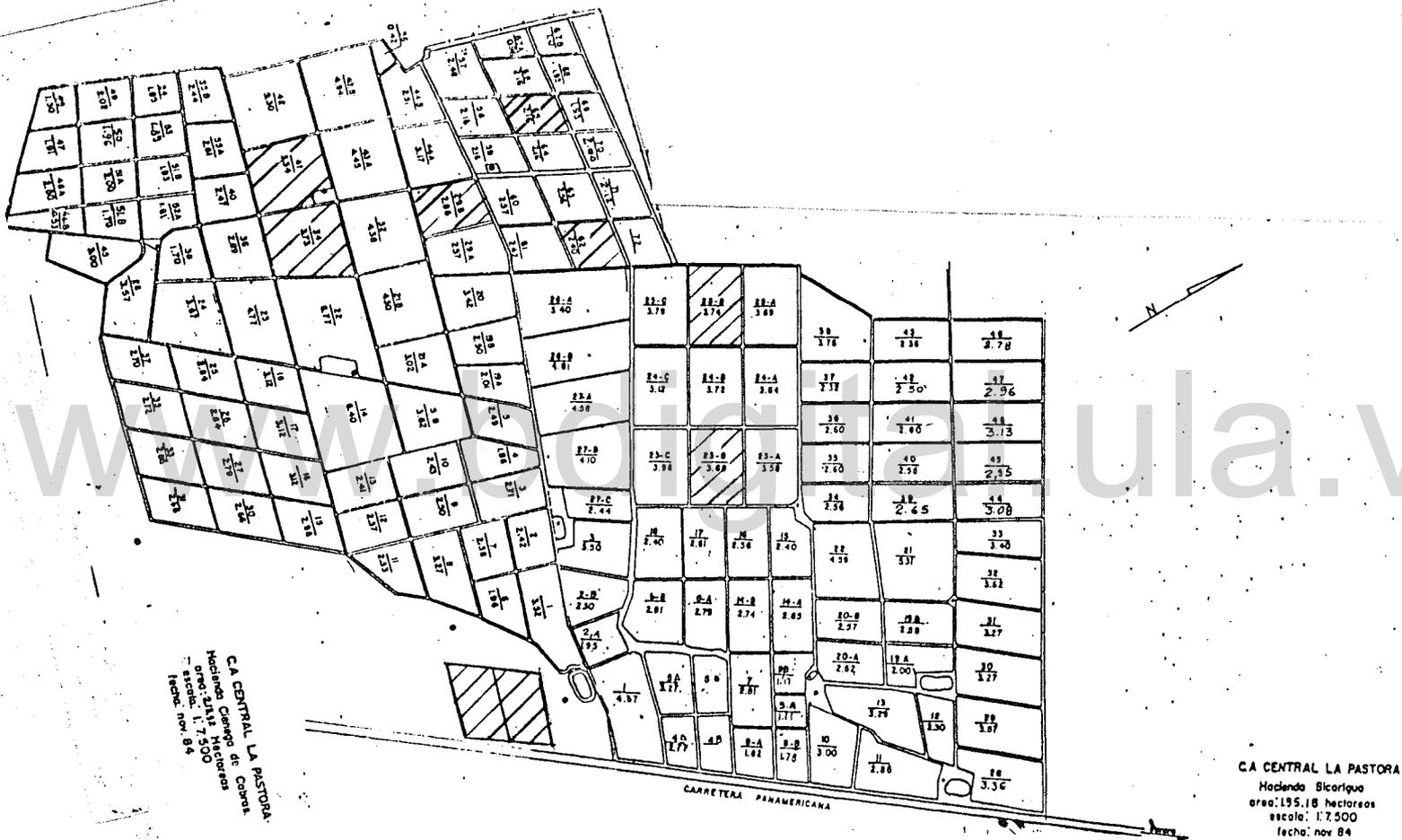


Figura 10. Distribución de los lugares de prueba.

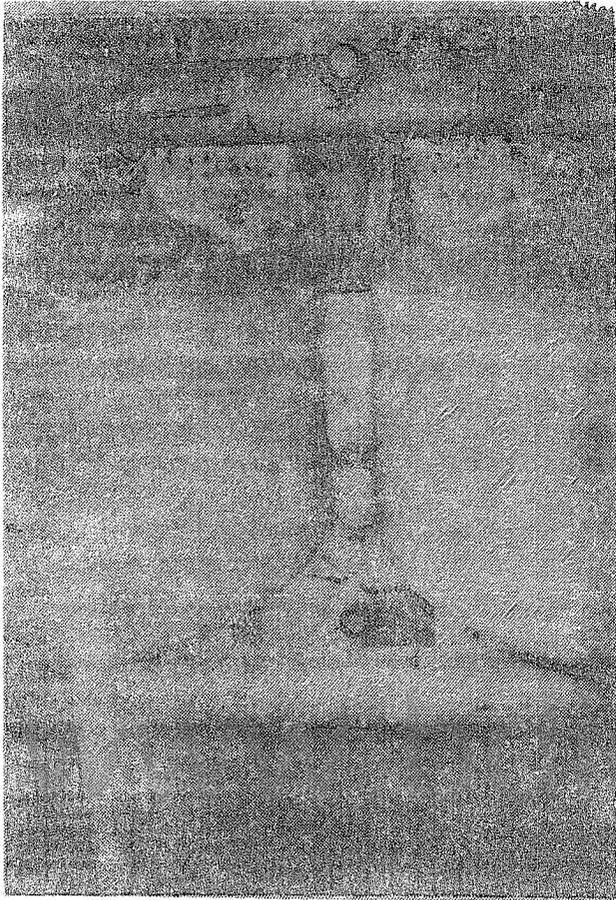
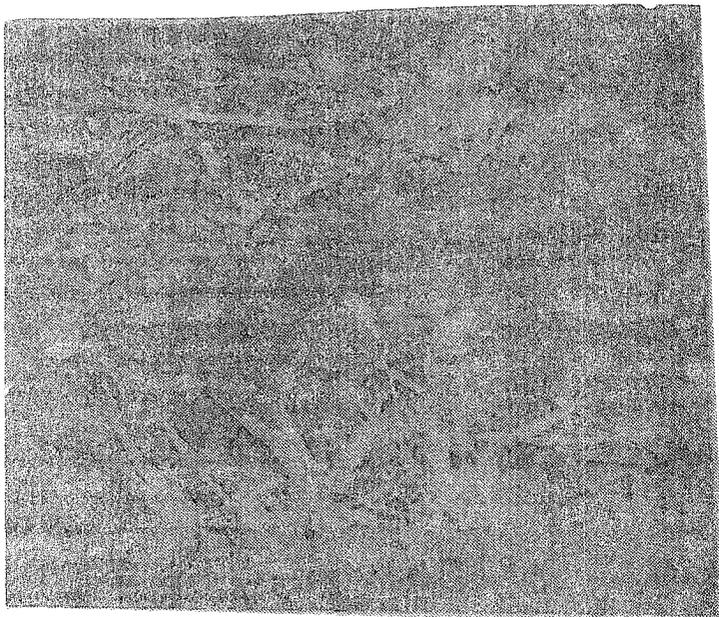


Figura 11. Ubicación de los manómetros en los filtros de arena.

(a)



Figura 12. Ubicación de los manómetros en la entrada (a) y en el extremo final del lateral (b).



(b)

nutos. En la Figura 13 y 14 se presenta una vista de la zanja excavada y la forma de obtener el volumen de agua para medir el caudal.

6. Las características de operación de la manguera de doble ducto se obtienen del catálogo del fabricante, particularmente en lo referente al diámetro de la cámara interna, separación y diámetro de los orificios internos y externos, así como la carga hidráulica de operación y caudal erogado por metro lineal.

7. El caudal que ingresa al sistema se obtuvo con los medidores que se encuentran instalados en cada unidad de control, el cual se verificó durante la realización de la prueba. Además se procedió a verificar el número de múltiples o subunidades en funcionamiento, con la finalidad de medir la presión en el extremo distal. En la Figura 15 se presenta la caja donde se encuentra instalado el medidor de caudales.

8. La determinación del ancho de humedecimiento de los laterales se hizo mediante secciones transversales en excavaciones hasta una profundidad de 30 cm, asimismo se ahondaron las excavaciones para determinar la profundidad de humedecimiento y de raíces.

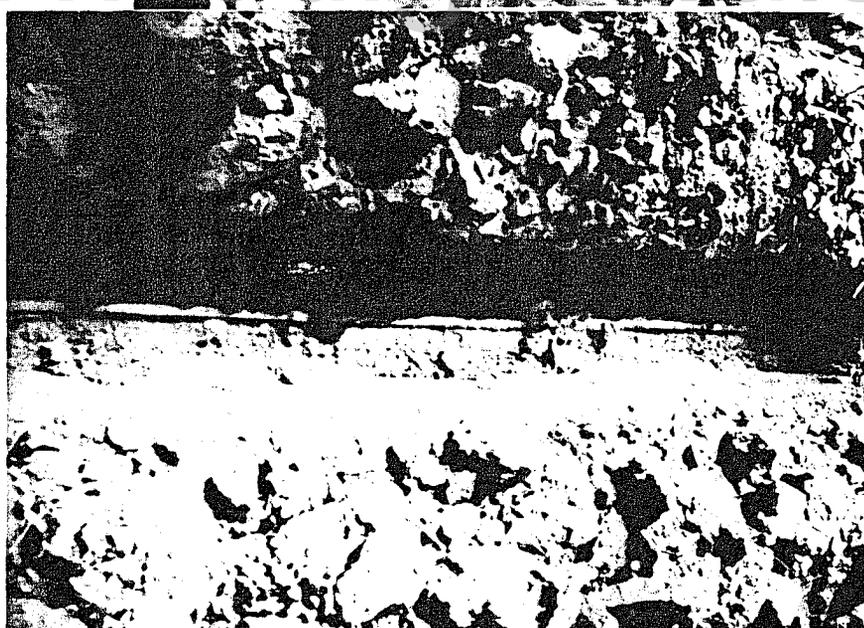
9. La medición de la presión de los laterales ubicados en el extremo distal de cada múltiple en funcionamiento se realizó mediante la conexión de un manómetro entre el elevador y el lateral, ya que la variación de presiones en dichos laterales afecta la uniformidad del sistema.

Parámetros de evaluación

Los parámetros empleados en el presente estudio fueron adaptados a la aplicación de agua por manguera doble ducto, en vista de que, generalmente, la mayor parte de información se refiere al método convencional de riego por goteo, es decir, gota a gota. Los parámetros utilizados fueron los siguientes:



(a)



(b)

Figura 13. Excavación de zanjas de prueba (a) y línea de riego con 4 orificios de emisión (b).



Figura 14. Obtención del volumen de agua en el lateral



Figura 15. Caja de control de caudal en l/s y registro de volumen en m³

- Profundidad de raíces. Se considera que la profundidad de mojado no deberá ser mayor un 10% a 20% superior al espesor de las raíces.

- Descarga de las mangueras doble ducto. Este parámetro se adapta a la expresión $q = e q_a / L$, siendo e el número de orificios del lateral, q_a el caudal promedio medido en la evaluación de cada subunidad y L la longitud del lateral.

- Relación de descarga-carga hidráulica. Se analiza mediante un análisis de regresión exponencial, con la finalidad de determinar su comportamiento hidráulico, teniendo presente que las evaluaciones se realizaron en su condición de funcionamiento normal.

- Uniformidad de emisión de la múltiple. Consiste en relacionar el caudal promedio del 25% de los emisores que erogaron los caudales más bajo, q_n , con el caudal promedio de la subunidad, q_a . Los resultados muestran que el 75% de la parcela recibe más de lo necesario y el 25% restante recibe lo justo.

- Factor de corrección, FRE, que agrupa las variaciones de las presiones de los laterales con la mínima presión de entrada. Esta variación de presiones incide en la distribución de agua en la parcela.

- Uniformidad de emisión del sistema, UE. Este parámetro que indica la eficiencia de distribución de agua en la parcela y se obtiene relacionando la variación de caudales con la variación de presiones, es decir, multiplicando la uniformidad de emisión de la múltiple con el factor de corrección, FRE.

- Lámina neta de riego, dn . Es la lámina de agua consumida por evapotranspiración en el intervalo de riego, más los requerimientos de lavado.

- Lámina bruta de riego, db . La lámina bruta resulta de la expresión $db = e q_a tr / Am$, considerando e como el número de orificios del lateral, q_a caudal promedio de emisión de la subunidad, tr tiempo de riego y Am área de humedecimiento de la franja de riego de un lateral.

- Eficiencia de aplicación, Efr. Parámetro que indica la eficiencia del manejo del agua en la parcela. Se determinó empleando el método expeditivo de Jensen (1967), donde se relaciona la lámina consumida por evapotranspiración con la lámina bruta aplicada.

Materiales e instrumentos utilizados

A fin de realizar las mediciones que comprende las pruebas de campo se emplearon los siguientes materiales e instrumentos:

Manómetro graduado de 0 - 30 PSI

Cronómetro

Probeta graduada en 500 ml

2 juegos de cilindros infiltrómetros

Cilindros muestreadores

Barreno

Cinta métrica

Bolsas plásticas

Pala.

CAPITULO IV

RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta los resultados de la evaluación de los diferentes sistemas que se encuentran funcionando en el área de estudio.

Profundidad de raíces y porcentajes de sombreado

Los cultivos de caña de azúcar en los diferentes tablones evaluados son caña soca, con profundidad promedio de raíces de 0,60 m. El porcentaje de sombreado se determinó relacionando el ancho que cubre el cultivo y el espacio entre laterales. Las plantas presentan una separación de 0,90 m y los laterales 3 m; esta disposición se esquematiza en la Figura 16.

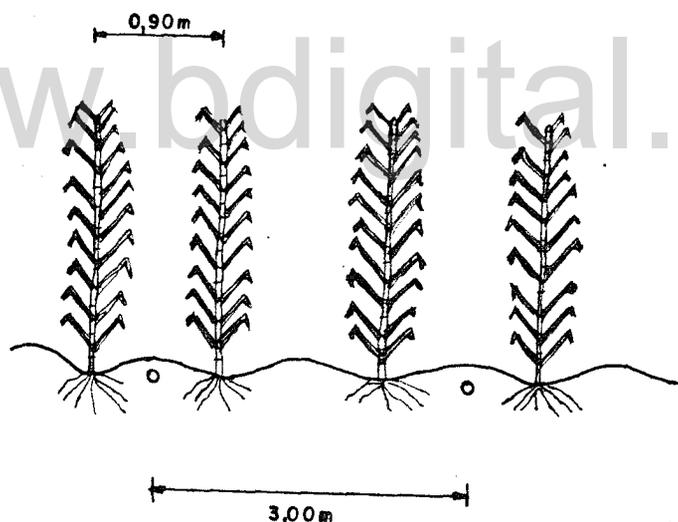


Figura 16. Separación entre plantas y laterales

Los valores calculados de porcentaje de sombreado fueron agrupados por edades, presentándose en la Tabla 11 y en la Figura 17.

Tabla 11. Valores de edad desde germinación - porcentaje de sombreado.

Meses	Porcentaje de sombreado
0 - 1	20
1 - 2	22
2 - 3	30
> 7	100

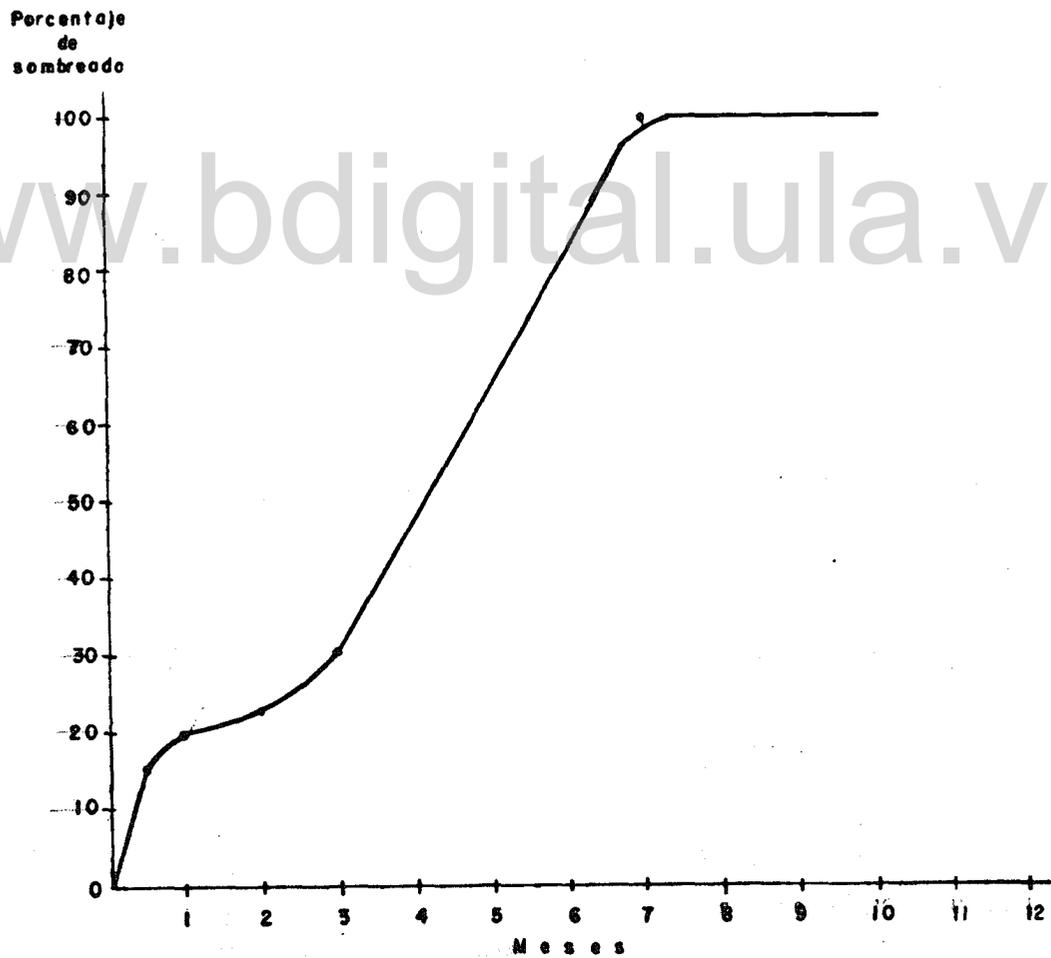


Figura 17. Relación edad de cultivo - porcentaje de sombreado.

Ancho y profundidad de humedecimiento

En cada tablón donde se realizaron las pruebas de evaluación se obtuvo el ancho de humedecimiento medido después del riego mediante secciones transversales a las líneas de emisión de agua, a la profundidad de 0,30 m. Los datos respectivos se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Ancho de humedecimiento en el lateral de riego

Tablón	Nº de riegos	Ancho de humedecimiento m		Promedio m
23 B	79	2,40	2,60	2,50
25 B	8	2,40	2,60	2,50
65	10	3,00	3,00	3,00
62	5	3,00	3,00	3,00
29 B	72	2,20	2,40	2,30
75 A	18	2,30	2,60	2,45
76 A	16	1,60	1,70	1,50
41 B	31	2,20	2,40	2,30
34 A	11	2,40	2,20	2,30

La profundidad de humedecimiento en la zona de estudio afecta a los sistemas Gastulo y Lister de Ciénega de Cabra, por presencia de una capa impermeable a menos de 1 m, donde el humedecimiento transversal a la línea de riego es uniforme, no así, en los otros sistemas donde el humedecimiento llegó hasta 1,50 m en promedio. En la Figura 18 se aprecia el exceso de humedecimiento en una sección transversal a la línea de riego en los suelos de textura fina.

Caudal de abastecimiento a las unidades de riego

En los sistemas evaluados se registró en los medidores de cada unidad de control el caudal y volumen de agua de abastecimiento a las unidades que conforman cada sistema; los datos obtenidos se presentan en la Tabla 13. El tiem-



Figura 18. Sección transversal a la línea de riego en los suelos de textura fina

Tabla 13. Caudal y volumen de abastecimiento por riego a los tablones evaluados.

Sistema	Tablón	Caudal (m ³ /h)	Volumen (m ³)
Ceibita	23 B	79,2	1742
	25 B	83,0	1826
Gastulo	65	115,0	2530
	62	108,0	2376
	29	108,0	2376
Ciénega de Cabra 7	75 A	58,0	1276
	76 A	79,2	1742
Ciénega de Cabra GA	41 B	162,0	3564
	34 A	162,0	3564

po de bombeo en los sistemas es continuo durante las 24 horas, considerándose un tiempo de operación efectivo de 22 horas. La frecuencia de riego de cada unidad es de 3 días de acuerdo al diseño original.

Presión en los filtros

Durante la realización del proceso de evaluación del filtrado se midie ron las presiones a la entrada y salida de los filtros de arena y de malla, respectivamente; esto con la finalidad de determinar la caída de presión que ocu rre en dichos equipos durante su operación y compararlo con los valores máximos permitidos. En la Tabla 14 se presentan las presiones obtenidas, así como las pérdidas de carga en los filtros para cada sistema evaluado.

Tabla 14. Relación de presiones en los filtros

Sistema	Tablones	Presión en los filtros		
		Entrada m (PSI)	Salida m (PSI)	Pérdida m (PSI)
Ceibita	23 B	14,08 (20)	11,27 (16)	2,81 (4)
	25 B	14,08 (20)	11,27 (16)	2,81 (4)
Gastulo	65	15,49 (22)	12,68 (18)	2,81 (4)
	62	15,49 (22)	14,08 (20)	1,41 (2)
	29	14,08 (20)	12,68 (18)	1,40 (2)
Cienega de Cabra 7	75 A	12,68 (18)	11,27 (16)	1,41 (2)
	76 A	9,86 (14)	8,45 (12)	1,41 (2)
Cienega de Cabra G A	41 B	12,68 (18)	9,86 (14)	2,82 (4)
	34 A	12,68 (18)	9,86 (14)	2,82 (4)

Características de la tubería doble ducto

Los laterales de los sistemas de riego son mangueras doble ducto, los cuales presentan orificios exteriores de 0,5 mm de diámetro, espaciadas cada 60 cm y orificios interiores cada 240 cm. El catálogo del fabricante indica

que estas tuberías trabajan con una carga hidráulica de 7 m (10 PSI) en la cámara principal, reduciéndose la presión en la cámara secundaria a 0,7 m (PSI), la descarga de la manguera por metro lineal es 1,153 l/h-m.

Caudales y presiones

En los tablonos donde se realizaron las pruebas se tomaron los volúmenes de agua de 16 lugares diferentes de acuerdo a la metodología presentada anteriormente; en cada uno de los lugares se registró el volumen de agua de 4 emisores en un tiempo de 2 minutos.

Los resultados de las pruebas de campo que expresan los caudales promedio por orificio y el caudal promedio de operación de cada unidad de riego, así como las presiones en diferentes lugares de cada uno de los laterales de prueba se presenta en la Tabla 15 y en el Apéndice 3. Los caudales por unidad de longitud para las respectivas unidades o tablonos se presentan en la Tabla 16. Estos valores fueron verificados relacionando el volumen de agua aplicado a la subunidad, con el tiempo de aplicación efectivo y la longitud total de manguera doble ducto, como se muestra en la Tabla 17.

Con la finalidad de definir el comportamiento hidráulico de los laterales se obtuvo la relación carga-caudal a partir de los datos de campo, para lo cual se grafican estos pares de valores obteniéndose una línea ajustada que sigue la siguiente ecuación $q = 1,05 h^{0,7}$ representada en la Figura 19.

Factor de corrección, FRE

Con la información de las presiones en las múltiples que trabajan simultáneamente en cada unidad de riego, se obtuvo el promedio y el mínimo valor de los laterales de mínima presión de entrada; estos valores son necesarios para calcular la corrección de la uniformidad de emisión de la múltiple, parámetro éste requerido para la evaluación del sistema.

El factor de corrección FRE está dado por la ecuación (2.4). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 18.

Tabla 15. Datos de caudal-presión del tablón 23 B.

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/3 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	1,39	1,50	1,35	1,05
1/3	1,31	1,28	1,20	1,01
2/3	1,35	1,28	1,28	0,90
Final	1,16	1,31	1,24	1,05
Presión	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)
Entrada	7,75 (11)	7,75 (11)	7,04 (11)	5,63 (8)
Final	7,04 (10)	7,04 (10)	6,69 (9,5)	4,90 (7)
Pérdida de carga (%)	9	9	5	13

Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) de todas las múltiples operando.

Múltiple

Presión (m)	5,63 (8)	7,04 (10)	7,04 (10)
Prom LMPE (m) =	6,55 (9)		
Min LMPE (m) =	5,63		

$$q_n = 1,00 \text{ l/h} \quad \Delta H_s = 2,85 \text{ m}$$

$$q_a = 1,23 \text{ l/h} \quad h_a = 6,04 \text{ m}$$

Tabla 16. Caudales por unidad de longitud

Tablón	L (m)	q_a (1/h)	Orificios	q (1/h-m)
23 B	160	1,23	267	2,05
25 B	160	1,30	267	2,16
65	135	1,62	226	2,71
62	150	1,46	251	2,44
29 B	129	1,49	216	2,49
75 A	150	1,33	251	2,22
41 B	98	1,52	164	2,54
34 A	170	1,36	284	2,27

Tabla 17. Caudales por unidad de longitud relacionando el volumen aplicado y el tiempo de riego.

Subunidad de riego	volumen aplicado (m ³)	tiempo de riego (horas)	longitud del lateral (m)	número de laterales	caudal erogado (l/h-m)
23 B	549	22	160	76	2,05
25 B	580	22	160	76	2,16
65	435	22	135	54	2,71
62	435	22	150	54	2,44
29 B	524	22	129	74	2,49
75 A	455	22	150	62	2,22
41 B	406	22	98	74	2,54
34 B	629	22	170	74	2,27

Tabla 18. Valores del factor de corrección de descarga FRE.

Sistema	Tablón	Factor de corrección
Ceibita	23 B	0,91
	25 B	1,04
Gastulo	65	1,15
	62	0,81
	29	1,04
Cienega de Cabra 7	75 A	1,00
	76 A	0,93
Cienega de Cabra 6 A	41 B	1,10
	34 A	0,72

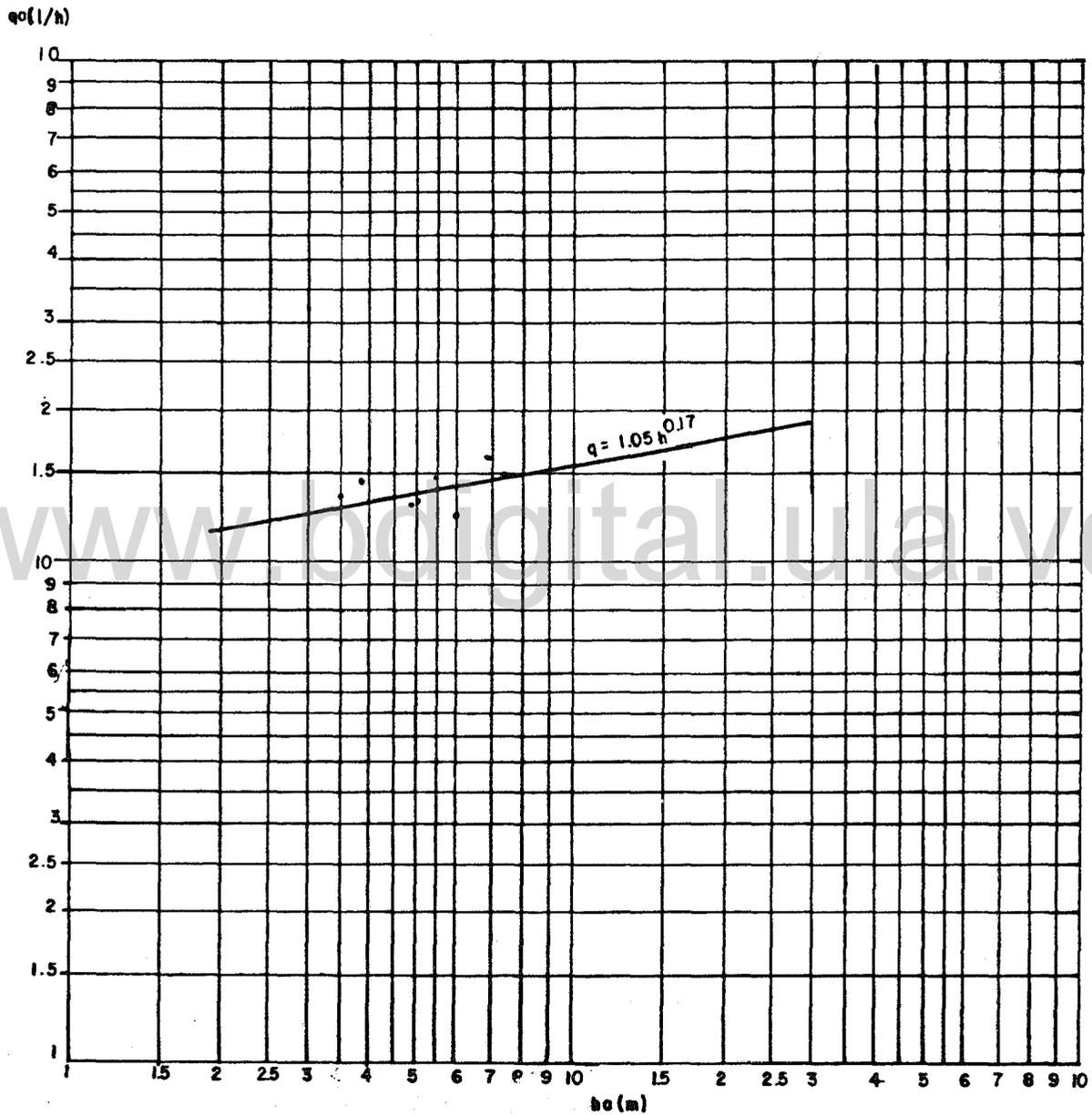


Figura 19. Relación entre caudal promedio y carga de presión de los diferentes tablonés.

Salinidad del agua de riego y tamaño de sedimentos

En el área de estudio se tomaron muestras de agua de las diferentes áreas de riego con el fin de determinar su salinidad mediante la conductividad eléctrica. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 19. Dichos valores no causarán problemas para ser utilizados en el riego de la caña de azúcar, según tabla de Ayers y Westcot (1976).

Tabla 19. Valores de salinidad del agua de riego

Sistema	CE x 10 ³ (mmhos/cm)
Ceibita	0,63
Gastulo	0,47
Ciénega de Cabra 7	0,49
Ciénega de Cabra 6 A	0,46

Con la finalidad de determinar el tamaño de partículas que dejan pasar los filtros, se tomaron muestras de agua a la entrada y en el extremo final de las tuberías laterales. El análisis de laboratorio indicó la presencia de partículas menores de 2 micras, cuyo valor es menor que 1/10 del diámetro de los orificios de la manguera doble ducto.

Uniformidad de emisión de la múltiple UEm y uniformidad del sistema, UE

En cada subunidad evaluada se determinó el caudal promedio, q_a , así como el promedio del cuarto inferior de los caudales, q_n . Estos datos se presentan en el Apéndice 3 para los tabloncillos correspondientes.

La relación de estos caudales determina la uniformidad de emisión de la múltiple, UEm (ecuación 2.3), los cuales son afectados por el factor de corrección FRE, determinando la uniformidad del sistema, UE (ecuación 2.6). Los resultados se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de uniformidad de emisión de la múltiple, UEm, y uniformidad del sistema, UE.

Sistema	Tablón	UEm %	UE %
Ceibita	23 B	81	74
	25 B	73	76
Gástulo	65	79	91
	62	74	78
	29	71	74
Ciénega de	41 B	57	63
Cabra 6A	34 A	72	52

Evapotranspiración máxima, ETm, de la caña de azúcar

Los datos proporcionados por la estación meteorológica Central La Pastora, para los meses de Marzo y Abril 1988, se utilizaron para determinar la evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo, por el método de Penman modificado, Doorembos y Pruitt (1976), así como la evapotranspiración máxima, ETm diaria para cada tablón evaluado. Los datos meteorológicos, así como los valores calculados de ETo se presentan en el Apéndice 4.

La evapotranspiración máxima para el intervalo de riego de 3 días según la fórmula de Penman se presenta en la Tabla 21, así como la evapotranspiración máxima diaria promedio. Tales cálculos se realizaron con datos meteorológicos medidos durante la experiencia.

Tabla 21. Valores de evapotranspiración máxima, ET_m acum, de la caña de azúcar para una frecuencia de 3 días y promedio diario.

Tablón	Fecha		Kc	ET _m acum mm	ET _m mm/día
23 B	1 al 3 de Marzo	238	1,05	14,6	4,9
25 B	5 al 7 de Marzo	23	0,50	8,7	2,9
65	6 al 8 de Marzo	30	0,50	9,2	3,1
62	9 al 11 de Marzo	16	0,50	10,8	3,6
29 B	13 al 15 de marzo	217	1,05	20,1	6,7
75 A	14 al 16 de Marzo	54	0,80	16,3	5,4
76 A	24 al 26 de Marzo	47	0,80	15,6	5,2
41 B	25 al 27 de Abril	95	1,00	19,7	6,6
34 A	25 al 27 de Abril	60	0,80	15,7	5,2

En el área de estudio la cosecha de la caña de azúcar no es uniforme presentando diferentes desarrollos vegetativos en un mismo sistema de riego; el kc utilizado fue para la condición de humedad relativa mínima mayor de 70% con vientos de ligera a moderada y para un período vegetativo de 12 meses, Doorembos y Pruitt (1976).

La evapotranspiración máxima, ET_m, para los diferentes meses de desarrollo vegetativo se calculó mediante el método de Norero (1976), que se basa en datos históricos de la evaporación de la tina, Tabla 3, afectado por el factor de desarrollo del cultivo, donde para el coeficiente de evaporación del suelo C y el índice de área foliar a, se toman valores de 0,61 y 7,8, respectivamente. En la Tabla 22 se presenta los valores obtenidos de máxima evapotranspiración diaria.

El método de Norero sobrestima con respecto al de Penman en la época de máximo desarrollo vegetativo; no así para el período de menor desarrollo. Todo el análisis posterior se refiere a las demandas calculadas con la fórmula de Penman.

Tabla 22. Evapotranspiración máxima diaria (mm/día) para diferentes períodos de desarrollo vegetativo *

Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Enero	3,8								
Febrero	4,7	4,4							
Marzo	5,6	4,8	4,5						
Abril	6,3	5,2	4,4	4,1					
Mayo	7,2	5,9	4,8	4,1	3,8				
Junio	9,9	8,4	6,8	5,6	4,7	4,4			
Julio	12,7	11,2	9,5	7,7	6,3	5,4	5,0		
Agosto	12,8	11,8	10,3	8,8	7,1	5,8	4,9	4,6	
Septiembre	11,5	11,2	10,2	9,0	7,6	6,2	5,1	4,3	4,0
Octubre	9,7	10,1	9,7	8,9	7,9	6,7	5,4	4,4	4,1
Noviembre	8,3	9,3	9,7	9,3	8,6	7,5	6,4	5,2	4,8
Diciembre	6,5	8,4	9,4	9,7	9,4	8,6	7,6	6,4	6,0
Enero		7,3	9,4	10,5	10,9	10,5	9,7	8,5	8,0
Febrero			8,3	10,8	12,1	12,5	12,1	11,1	10,5
Marzo				8,5	11,3	12,3	12,7	12,3	11,9
Abril					7,8	10,4	11,3	11,7	11,6
Mayo						7,3	9,5	10,5	10,9
Junio							8,4	11,0	11,7
Julio								9,6	11,0
Agosto									6,8

* El primer valor corresponde al mes siguiente al corte de la caña

Umbral de riego

A partir de las curvas de retención de humedad que se presentan en el Apéndice 1, se determinaron los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez permanente, es decir, a 1/3 y 15 atmósferas, respectivamente, y, a partir de pruebas de campo se obtuvo el contenido de humedad antes del riego. El umbral utilizado en el momento del riego se obtuvo relacionando la

humedad consumida y la humedad total disponible, todos estos datos figuran en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores del umbral de riego empleados en el momento de la aplicación de agua.

Tablón	Contenido de humedad Tensión en atmósferas			Umbral de riego actual %
	0,33	En el momento de riego	15	
41	36,7	34,2	19,2	14
29	50,1	42,8	29,8	36
23 B	42,2	34,6	22,9	39

Requerimiento de lavado

El requerimiento de lavado se determinó teniendo en cuenta el criterio de Jensen (1981), que dice que la producción máxima de la caña de azúcar se obtiene con una salinidad del extracto a saturación hasta 1,7 mmhos/cm y comienza a decrecer 5,9% por cada mmhos/cm que se incrementa la concentración en el suelo. Bajo este criterio la máxima conductividad eléctrica del extracto de saturación, $\max CE_e$, es 18,6 mmhos/cm, por lo cual el requerimiento de lavado para cada tablón se obtuvo con la ecuación (2.20). Los resultados obtenidos incluyen valores pequeños, que varían entre 1 y 2%, por lo tanto no influyen en la cuantía de la lámina de riego. Los valores se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Valores de requerimiento de lavado, RL

Tablón	CEr	Máx CE	RL
23 B	0,63	18,6	0,02
25 B	0,63	18,6	0,02
65	0,47	18,6	0,01
62	0,47	18,6	0,01
29	0,47	18,6	0,01
75 A	0,49	18,6	0,01
76 A	0,49	18,6	0,01
41 B	0,46	18,6	0,01
34 A	0,46	18,6	0,01

www.bdigital.ula.ve

Tabla 25. Valores de eficiencia de aplicación.

	Tablones evaluados								
	23 B	25 B	65	62	29 B	75 A	76 A	41 B	34B
Edad (días)	238	23	30	16	217	54	47	95	60
Volumen total de agua entregado a la unidad, m ³ .	1742	1826	2530	2376	2376	1276	1742	3564	3564
Volumen de agua entregado a la sub-unidad, m ³	573	608	441	460	592	481	505	594	1029
Longitud del lateral, m	160	160	135	150	129	150	150	98	170
Número de orificios del lateral,	267	267	226	251	216	251	251	164	284
Caudal promedio por orificio q _a (l/h)	1,23	1,30	1,62	1,46	1,49	1,33	1,23	1,52	1,36
Número de laterales de la subunidad,	76	76	54	54	74	62	70	74	74
Volumen aplicado por el sistema a la subunidad, m ³	549	580	435	435	524	455	475	406	629
Eficiencia de conducción del sistema de la subunidad (%)	96	95	99	95	89	95	94	68	61
Area humedecida por lateral, m ²	400	400	495	450	297	368	368	225	391
Area humedecida en la subunidad, m ²	30400	30400	21600	24000	21978	22816	25760	16650	28934
Lámina bruta aplicada mm	18,8	20,0	20,1	18,1	24,0	19,9	19,6	35,7	35,6
Lámina a reponer + requerimiento de lavado, mm	14,9	2,9	3,0	2,6	20,1	5,20	5,0	8,0	5,7
Eficiencia de aplicación %	81	15	15	14	84	26	26	22	16
Tiempo de operación (h.) para una eficiencia de aplicación de 90%	20	4	4	4	21	6	7	8	6

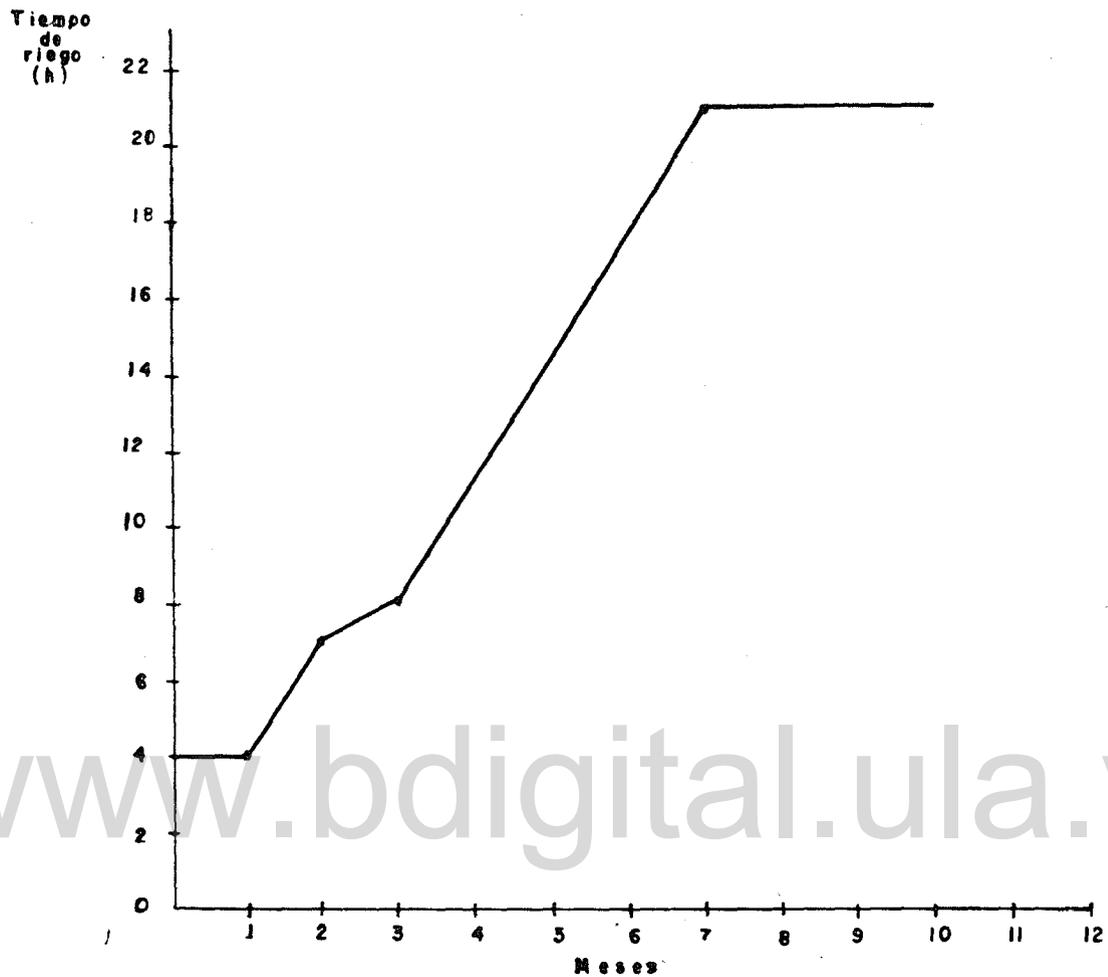


Figura 20. Relación edad del cultivo - tiempo de riego para una eficiencia de 90%.

Tabla 26. Rendimiento del cultivo de la caña de azúcar, Tn/Ha

Año	23B	25B	65	62	29	41	34A
1984	132	148					
1985	103	121					
1986	91	121					
1987	122	103			125	136	96
1988	111	104	115	147	126	123	91

ta fue 100,67 Tn/Ha y para la caña soca de 86,14 Tn/Ha. Cabe destacar que estos resultados son los rendimientos obtenidos en condiciones normales en el gran cultivo.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO V

DISCUSION DE RESULTADOS

En la zona de estudio los suelos no tienen problemas de salinidad, debido a que el mayor valor con respecto al extracto 1:2 fue de 0,2 mmhos/cm y el rango para obtener una producción máxima es hasta 1,7 mmhos/cm.

La densidad aparente con predominancia de suelos finos, presenta un valor promedio de $1,54 \text{ gr cm}^{-3}$, valor elevado para dichos suelos. Esto puede ser producto de la compactación causada por el pase de vehículos en los tablones en la época de carga o a las arcillas expansibles; lo que trae como consecuencia que la capacidad de aire a nivel de raíces sea en promedio 6%, lo que está por debajo de los niveles óptimos, que son 10 a 12%. La reducida aereación puede causar problemas en el desarrollo vegetativo de la caña de azúcar y afectar los rendimientos. En cambio, en los suelos medios, la densidad aparente en promedio es $1,50 \text{ gr cm}^{-3}$, con una capacidad de aire promedio de 21%, que es característico de estos suelos.

El contenido de humedad consumida o agotada por los cultivos en los lugares donde se hicieron las evaluaciones, está en función de la edad de la planta, así, en el tablón 41 con cultivos de 95 días, el contenido de humedad consumida es el 14%, y para el tablón 29 B, con cultivos de 217 días, el contenido de humedad consumida es de 36%. Estos tablones se ubican en el sector de suelos finos. En los suelos medios se evaluó el tablón 23 B, donde a los 238 días la humedad consumida por la planta era el 39%.

Estudios realizados en el cultivo de la caña de azúcar aconsejan que para obtener una producción óptima, el contenido de humedad debe ser el necesario para que la succión se encuentre entre 0,33 y 3 atmósferas, debido a que en este rango la planta no tiene dificultades de extracción de agua para satisfacer la evapotranspiración, o sea, si se considera una tensión de humedad de 1,7 atmósferas, que es el valor promedio del rango antes indicado, se tiene un agotamiento promedio para la zona de estudio del 40%, valor éste que se debe adoptar como

umbral de riego en la zona, ya que en riego por goteo los umbrales de riego son cercanos al 50% de la humedad disponible.

Los datos obtenidos de las pruebas de infiltración realizadas en el área de estudio, un día antes del riego, empleando los cilindros infiltrómetros, indican valores elevados para los suelos finos, pues se obtuvo un exponente promedio de infiltración acumulada de 0,83 y una infiltración al primer minuto de 0,38 cm. Tales valores no son característicos de estos suelos, lo que se debe al agrietamiento superficial causado por la diferencia de humedad entre la capa superficial y las inferiores, dado que la manguera doble ducto se encuentra a 20 cm debajo de la superficie del terreno, y la aplicación de agua es semejante al riego por subirrigación. Los valores obtenidos para los suelos medios son los característicos de tales suelos, donde el exponente de la ecuación de infiltración acumulada es 0,55 y la infiltración al primer minuto es 3,3 cm.

El método empleado para determinar la infiltración, sin duda se adapta al riego por superficie, ya sea melgas, pozas o surcos, pero los resultados obtenidos para los suelos de textura fina son altos, lo que indicaría que al emplear riego por surco se producirían excesivas pérdidas, lo que se evita empleando el riego por goteo, donde el agua es conducida a la planta por tuberías.

El enraizamiento promedio de la caña de azúcar es 60 cm, como consecuencia del alto contenido de humedad que se presenta precisamente en dicha profundidad. Los contenidos de humedad encontrados a la altura de la zona de raíces fueron del 34,4% en promedio para suelos finos, en los cuales la succión matriz varía entre 0,25 - 1,80 atmósferas. Los suelos medios presentan un contenido de humedad de 34,6% con una tensión de 1,10 atmósferas. Los valores de retención de humedad en los suelos finos menores de 0,33 atmósferas, traen como consecuencia: exceso de humedad, reducción de aireación, limitaciones del desarrollo radical y posible problema fitosanitario. En la Figura 21 se presenta una sección transversal de los suelos finos donde se observa el exceso de humedad en el fondo de la zanja.



Figura 21. Sección transversal típica en los
suelos finos

En la Figura 17 se aprecia el porcentaje de sombreado del cultivo. Este factor comprende a las partes transpirantes de la planta como lo son la masa de follaje, la superficie total de las hojas que está en función de la edad del cultivo; lo que incide en la evapotranspiración como un factor de corrección, ya que las necesidades hídricas son diferentes para los distintos períodos vegetativos de la planta.

El ancho de humedecimiento promedio en los tabloncillos evaluados para los suelos finos es de 2,40 m y para los suelos medios de 2,50 m. Boswell (1984), en investigaciones hechas con tuberías doble ducto, encontró que para suelos muy pesados el ancho de humedecimiento varía entre 2,40 y 3,60 m y para suelos medios entre 1,80 y 2,80 m, por lo que se considera que los anchos de humedecimiento encontrados están dentro del rango común y que satisface la humedad necesaria a 2 hileras de plantas.

La profundidad de mojado es otro de los parámetros que se evaluaron en el estudio. Los suelos finos presentan una profundidad de humedecimiento que está afectado por la presencia de una capa impermeable a menos de 1 m, donde

se observa exceso de humedad. En los suelos medios la profundidad de humedecimiento llega hasta 1,50 m; las mediciones realizadas muestran que las profundidades de humedecimiento son mayores que la profundidad radicular, que es 60 cm, lo que indica sustanciales pérdidas por percolación, ya que el humedecimiento debe ser mayor o menor del 15% de la profundidad radicular, o sea, que la profundidad de humedecimiento debe estar entre 50 y 70 cm.

Durante la operación de riego se observó que la pérdida de carga en los filtros está alrededor de 2,2 m (3 PSI); esto indica que están funcionando eficientemente, ya que se recomienda lavarlos cuando se produce una caída de presión de 7,00 m (10 PSI).

El caudal erogado por los orificios de los laterales, mangueras doble ducto, difiere de las características que da el fabricante. El caudal de emisión, medido actualmente, es en promedio ponderado 2,31 l/h-m, variando entre 2,05 y 2,71 l/h-m. Estos valores obtenidos donde los laterales fueron expuestos a la superficie del terreno, fueron corroborados en las condiciones de funcionamiento, como se muestra en las Tablas 16 y 17, respectivamente, mientras que el fabricante indica un valor promedio de 1,153 l/h-m para la misma carga hidráulica.

Con la carga de operación de cada subunidad y con el caudal promedio se estimó el comportamiento de la tubería doble ducto, cuya ecuación de descarga obtenida a partir de los datos de campo es $q = 1,05 h^{0,17}$; donde el exponente expresa la sensibilidad de emisión de la variación de presiones, el cual es menor de 0,5, tal como lo denotan las publicaciones sobre este tipo de manguera.

La pérdida de carga recomendada para los laterales en tubería doble ducto es de 10 a 15%. Analizando los resultados obtenidos en las diferentes posiciones, es decir, a la entrada, a 1/3, 2/3 y en el extremo final de las múltiples, las pérdidas de carga promedio son 10, 10, 7 y 10%, respectivamente, Tabla 27, lo que significa que están en el rango recomendado.

Tabla 27. Promedio de pérdidas de carga por ubicación de lateral.

Tablón	Laterales ubicados			
	Entrada	1/3	2/3	Final
23 B SIC	9	9	5	13
25 B SIC	20	20	7	7
65 C de C	10	5	10	5
62	7	8	8	18
75 A	5	12	6	8
41 B	9	9	0	9
34 A	12	6	6	10
Promedio	10	10	7	10

Con los datos de las presiones de las múltiples se obtuvo el promedio a la entrada y en el extremo final: 7,13 y 6,20 m, respectivamente, de manera que resulta una pérdida de carga promedio de 13%, que es mayor que el 6% determinado por la ecuación de Darcy-Weisbach, aún cuando los valores obtenidos por la ecuación mencionada no toma en cuenta la pérdida que causan las púas de los elevadores que están introducidos 30 mm en la múltiple, esto debido a que no se cuenta con información. La máxima profundidad de las conexiones en riego por goteo es de 7 mm, que es el caso de goteros con púas insertadas en los laterales, lo cual es diferente al caso de las múltiples. En las Tablas 28 y 29 se presentan las pérdidas de carga promedio de las múltiples y las estimadas por la ecuación de Darcy-Weisbach.

La uniformidad de emisión de los diferentes sistemas es baja; solamente en una subunidad se encontró un valor excelente, los demás resultados están entre regular y pobre, siendo sus valores menores del 78%, cuando en diseño se considera un valor del 90%. Esta baja uniformidad encontrada mejoraría sustancialmente haciendo modificaciones de las presiones de trabajo que se emplean actualmente. Los cálculos realizados para una subunidad promedio indican que se podría obtener una uniformidad de emisión de hasta el 99%, considerando una

Tabla 28. Pérdida de carga promedio de la múltiple

Tablón	Entrada (m)	Final (m)
23 B	8,75	6,63
25 B	6,28	5,93
65	7,04	7,04
62	5,93	4,87
29 B	7,34	7,34
75 A	7,33	5,58
41 B	7,75	7,75
34 A	6,63	4,52
Promedio	7,13	6,20

$$\text{Pérdida de carga promedio de las múltiples} = \frac{7,13 - 6,20}{7,13} \times 100 = 13\%$$

Tabla 29. Estimación de las pérdidas de carga de las múltiples empleando la ecuación de Darcy-Weisbach (Rázuri, 1987).

Datos Hidráulicos	Tablones							
	23 B	25 B	65	62	298	75 A	41 B	34 A
q_a (l/h)	1,23	1,30	1,62	1,46	1,49	1,33	1,52	1,36
l (m)	160	160	135	150	129	150	98	170
L_t (m)	114	114	81	81	111	93	111	111
N_0	267	267	226	251	216	251	164	284
N_e	38	38	27	27	37	31	37	37
F	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
D (mm) 75	69,2	69,2	69,2	69,2	69,2	69,2	69,2	69,2
q_l (l/h)	328,41	347,1	366,1	366,5	321,5	333,83	249,3	386,2
Q_t (m ³ /h)	12,5	13,2	9,88	9,90	11,9	10,3	9,22	14,3
J (m/100 m)	1,27	1,39	0,84	0,86	1,18	0,92	0,74	1,62
h_f (m)	0,54	0,59	0,26	0,26	0,50	0,32	0,31	0,68
H_m	8,75	6,28	7,04	5,93	7,34	7,33	7,75	6,63
h_{nt}	8,21	5,69	6,78	5,67	6,84	7,01	7,44	5,95
Pérdida de carga (%)	6,2	9	4	4	7	42	4	10

Pérdida de carga promedio de la múltiple = 6%

presión de entrada en la múltiple de 9,31 m (13 PSI) y en el extremo distal de la subunidad 7,74 (11 PSI), siendo estos datos mayores a los encontrados en el campo, que son 7,13 m (8,9 PSI) y 4,57 m (6,5 PSI) en promedio. Los cálculos y la distribución de presiones de la subunidad se presentan en la Tabla 30 y Figura 22.

Los requerimientos de lavado, la relación entre la calidad del agua de riego y la salinidad del suelo para una determinada producción varían entre 1 y 2%; estos valores son bajos y no influyen en la lámina de reposición.

La evapotranspiración máxima, ET_m , del cultivo depende del período vegetativo y de las características de desarrollo foliar, además de las características climáticas. Esto hace que las necesidades hídricas difieran de un período a otro o mes a mes, lo que significa que la lámina de aplicación debe estar de acuerdo con la edad de la planta. En los sistemas evaluados, con un tiempo de riego de 22 horas, y una frecuencia de 3 días, constante para todas las áreas, la eficiencia de aplicación difiere considerablemente según la edad del cultivo, como se aprecia en la Tabla 23, originando pérdidas por percolación, que varían entre 86 y 16%. Esta baja eficiencia de aplicación se puede corregir haciendo variar el tiempo de funcionamiento de las unidades de riego, siendo esta operación factible en estos sistemas, en vista que cada unidad y subunidad presenta dispositivos de control y de fácil manejo.

En la Figura 20 se presenta la relación entre el tiempo de operación y la edad del cultivo, para una eficiencia de aplicación del 90%, en las condiciones en que se encuentra el sistema, y que se puede adoptar para el área de estudio.

Los rendimientos de la caña de azúcar en la zona son mayores en caña planta que en caña soca por cualquiera de los métodos de riego aplicados, siendo la preparación de los campos en la época de sembradío uno de los factores que influyen al respecto. Los mayores rendimientos obtenidos con riego por goteo son muy significativos, con respecto a los otros métodos de riego utilizados; así, comparándolo con el riego por gravedad el incremento es del 14% en

Tabla 30. Determinación de las presiones en una subunidad promedio con el fin de mejorar la uniformidad de emisión a nivel de terreno.

Lateral	Múltiple	Sistema
$q = 1,05 h^{0,17}$	$L = 112 \text{ m}$	$H_{nt} = 7,81 \text{ m}$
$h_a = 7 \text{ m}$	$D = 75 \text{ mm (69,2)}$	$h_n = 6,74 \text{ m}$
$q_a = 1,46 \text{ l/h (0,088 l/s)}$	$S_l = 3 \text{ m}$	$\Delta H_s = 1,57$
$l = 130 \text{ m}$	$N_l = 38$	$\Delta h_t = 0,50 \leq \Delta H_s = 1,57$
$S_o = 0,60 \text{ m}$	$Q_m = 3,34 \text{ l/s}$	$q_n = 1,45 \text{ l/h}$
$N_o = 217$	$N = 38$	$UE = 99\%$
$D = 15 \text{ mm}$	$F = 0,375$	
$F = 0,37$	$J = 1,18 \text{ m/100 m}$	
$S = 0,003 \text{ m/m}$	$H_f = 0,496 \text{ m}$	
$J = 2,90 \text{ m/100 m}$	$H_m = 8,31$	
$h_f = 1,39 \text{ m}$	$H_{nt} = 7,81$	
$t' = 0,768$		
$h_1 = 8,13 \text{ m}$		
$h_n = 7,06 \text{ m}$		

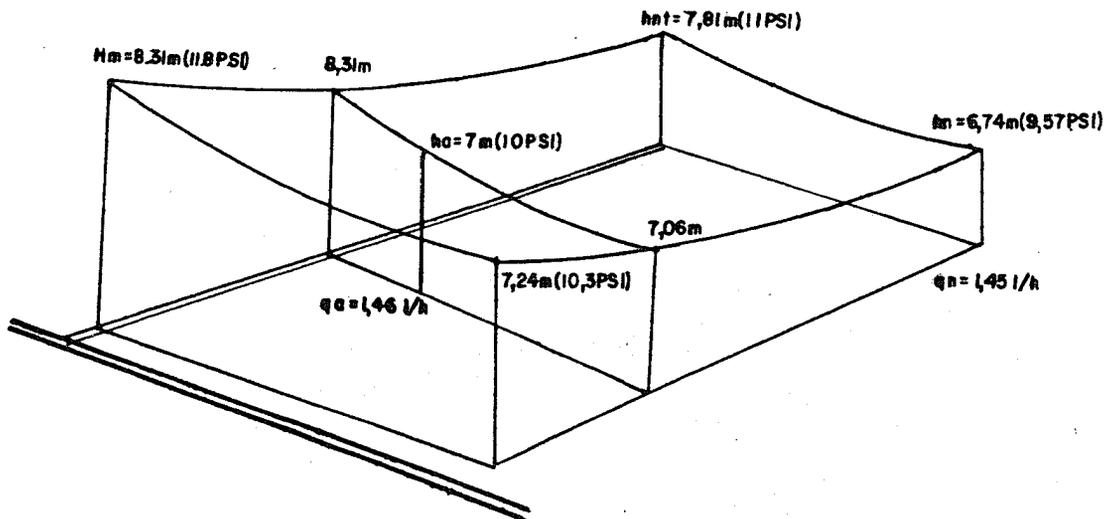


Figura 22. Distribución de presiones en la subunidad promedio.

caña planta y 34% en caña soca y, con respecto al riego por aspersión, el incremento del 26% en caña planta y 34% en caña soca. Es de hacer notar que el riego por goteo aventaja a los otros métodos en la disponibilidad de nutrientes debido a la aplicación del fertilizante, que es localizado. En la Tabla 31 se comparan los rendimientos en Tn/Ha de los diferentes métodos de riego.

Tabla 31. Comparación de los rendimientos obtenidos por los diferentes métodos de riego en Tn/Ha.

	Método de riego			Relación	
	Gravedad	Aspersión	Goteo	Goteo gravedad	Goteo aspersión
Planta	110,93	100,67	127	1,14	1,26
Soca	84,18	86,18	113	1,34	1,34

Se hace notar que es necesario realizar un estudio comparativo en igualdad de condiciones donde se analizara la bondad que ofrece cada método de riego.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

De las evaluaciones realizadas en los diferentes sistemas de riego por goteo en las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra se concluye lo siguiente:

Los suelos de la zona de estudio no presentan problemas de salinidad, pero el porcentaje de aireación a nivel de raíces en los suelos de textura fina es reducido, lo que causa efectos negativos en la producción.

En el área cultivada con caña de azúcar no se realiza el control de humedad del suelo en el momento de riego, lo que trae como consecuencia que se apliquen cantidades de agua excesivas, por lo que debería aplicarse un manejo de riego diferente y proceder al ajuste de las entregas de acuerdo a las verdaderas necesidades.

En las haciendas Sicarigua y Ciénega de Cabra el corte de caña no es uniforme, por lo que se tiene caña de diferentes edades en un mismo sistema.

En los sistemas de riego la caída de presión en los filtros durante el funcionamiento es baja, pues siempre se mantiene con un valor menor al máximo aceptado, que es 7 m (10 PSI), por lo cual están operando eficientemente.

La distribución del agua hacia las unidades y subunidades de riego presenta pérdidas que se observan en las uniones con las válvulas o llaves mal cerradas, lo que afecta las eficiencias de conducción.

El caudal promedio erogado por metro lineal en la subunidad de riego es 2,31 l/h-m, siendo 100% mayor con respecto al especificado por el fabricante; esto puede ser debido al deterioro que sufre la manguera con el tiempo.

La pérdida de carga promedio en las múltiples es mayor que la obtenida por la ecuación de Darcy-Weisbach, siendo una de las causas las púas de conexión de los laterales, cuya inserción representa el 43% del diámetro.

La uniformidad de emisión de los sistemas, entre 78 y 52%, puede calificarse de regular a pobre, debido a la variación de los caudales y de las presiones en cada subunidad.

Para mejorar la uniformidad de emisión de los sistemas, la presión de entrada en la múltiple se debe adaptar a 9,31 m (13 PSI), que es lo que resulta de los cálculos para una subunidad típica.

La eficiencia de aplicación en los sistemas evaluados presenta valores muy bajos, entre 14 y 26%, para los cultivos de menor edad y valores relativamente altos, entre 81 y 84%, cuando el cultivo se encuentra en pleno desarrollo vegetativo.

La eficiencia de aplicación mejoraría haciendo variar los tiempos de operación de riego en función de la edad de la caña, tal como lo indica la Figura 20.

Los rendimientos de caña de azúcar son significativamente superiores en riego por goteo, en comparación a los métodos de gravedad y aspersion, en las condiciones de manejo de los mismos, en el gran cultivo.

Recomendaciones

Realizar un control periódico de la aireación del suelo a nivel de raíces, para prevenir problemas en la producción y enfermedades fitosanitarias.

Evitar el excesivo pase de vehículos por los tablonos en la época de carga para reducir la compactación de los suelos y evitar daños de la manguera de doble ducto.

El riego por goteo de la caña de azúcar no se realiza a un umbral de finido, por lo que se podría adoptar el contenido de humedad a una succión de 1,7 atmósferas, aunque es conveniente investigar la respuesta del cultivo a diferentes niveles de humedad en el suelo.

Verificar después de cada cosecha el caudal erogado por la línea de riego, ya que las mangueras de doble ducto, después de un período de tiempo, se deterioran.

Las haciendas deben contar con las memorias descriptivas de los sistemas instalados para verificar las presiones en los laterales, múltiples y en la unidad de control.

Se recomienda realizar investigaciones en laboratorios sobre la manguera de doble ducto, debido a la escasa información existente, a fin de determinar el caudal erogado por metro lineal, pérdida de carga y su comportamiento hidráulico en general, en condiciones reales de funcionamiento.

Se recomienda determinar las pérdidas de carga en las múltiples cuando se tiene inserciones muy profundas de los laterales que ofrecen resistencia al paso de flujo.

www.bdigital.ula.ve

BIBLIOGRAFIA

- Ayers, R.S. and D.W. Westcot, 1976. Water quality for agriculture, FAO. Irrigation and Drainage paper N° 29.
- Boswell, M.J. 1984. Micro-irrigation design manual. Hardie-Irrigation. USA.
- Burman, R.D., P.R. Nixon, J.L. Wright and W.O. Pouitt. 1980. Design and operation of farm irrigation systems, chapter 6: Water requerimiento, ASAE, 189-232 p.
- Doorembos, J. y W. Pruitt. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje N° 24.
- FUDECO. 1979. Situación y perspectivas de desarrollo del Distrito Torres. Fundación para el Desarrollo de la Región Centro Occidental, FUDECO. Barquisimeto. 140 p.
- Goldberg D., B. Gornat, D. Rimón. 1976. Drip irrigation principles, design and agricultural practices. Drip Irrigation Scientific Publications, Isnall. 196 p.
- González, M. 1984. Requerimiento de riego para caña de azúcar con fines de formulación de programas de operación. Hacienda Sicarigua y Ciénega de Cabra. Inédito.
- Grassi, C.J. 1987. Relación agua-suelo-planta. Material de clase. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Husz, G. 1968. Archivos del Instituto Central de Investigaciones Azucareras, Casa Grande, Trujillo, Perú.
- Hillel, D. 1982. Advances in irrigation. Academic Press. New York, USA, Volumen 1. 302 p.
- Jensen, M. 1967. Evaluating irrigation efficiency. Journal of Irrigation and Drainage Division. Proceeding of the American Society of Civil Engineers 93 Vol. (1). 83-97 p.
- Jensen, M. 1974. Consumptive use of water and irrigation water requirements, ASCE. Irrigation and Drainage Division, 22 p.
- Jensen, M. 1981. Design and operation of farm irrigation systems U.S. Department of Agriculture. ASAE. 828 p.
- Keller, J. 1978. Trickle irrigation. En: National Engineering Handbook. Soil Conservation Service. 201 p.
- Keller, J. 1983. Manual de diseño de sistemas de riego por aspersión y goteo.

Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University Logan, UTAH 84322 USA 16 Cap.

- Kijne, J. 1974. Drainage principales and applications, International Institute for Land Reclamation and Improvement Wageningen, the Netherlands 16, Vol. (3) 53-11 p.
- Mariñez, A. 1980. Disponibilidad de agua superficial en el Distrito Torres, Estado Lara. Tesis MSc. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 74 p.
- Norero, A. 1976. Evaporación y transpiración. CIDIAT. Mérida, Venezuela, 60 p.
- Osorio, A. 1980. Análisis de algunos factores hidráulicos que afectan el diseño de laterales en riego por goteo. Tesis MSc. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 98 p.
- Rázuri, L. 1987. Diseño del riego por goteo. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 165 p.
- Robinson, F.E. 1963. Soil moisture tension, sugar cane stalk elongation and irrigation control. Agronomy Journal 55, 481-483 p.
- Torras, S. 1987. Problemática del riego de la caña de azúcar en el área Urena-San Antonio. Tesis MSc CIDIAT. Mérida, Venezuela. 272 p.
- U.S. Salinity Laboratory, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. Agricultural Handbook N° 60, 160 p.
- SCS. 1984. Trickle Irrigation. En: National Engineering Handbook. Sección 15, Irrigation, Chapter 7. Soil Conservation Service. 127 p.
- Vásquez, A., E. Paz-Vergara, S. Helfgott. 1979. El riego en el cultivo de la caña de azúcar en el Perú. Instituto Central de Investigaciones Azucareras, Perú. 150 p.
- Wohlers, C. 1978. Evaluación de un sistema de riego por goteo. Tesis MSc. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 128 p.

A P E N D I C E

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

A P E N D I C E 1

Contenido de humedad volumétrico a diferentes tensiones
Curva de retención de humedad

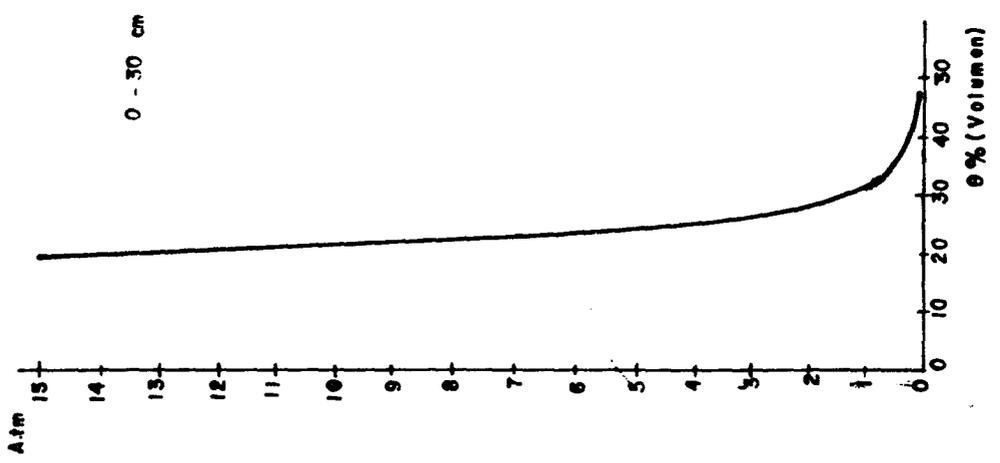
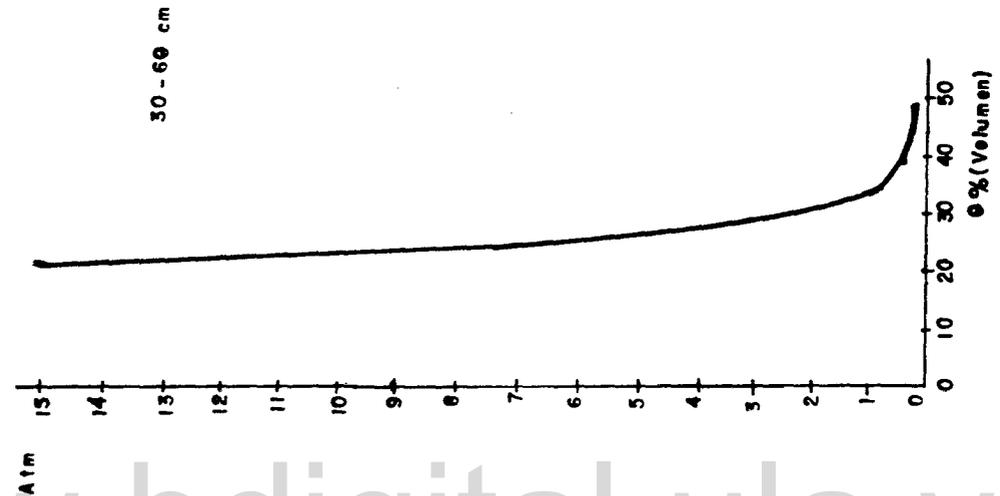
www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

Contenido de humedad volumétrico a diferentes tensiones

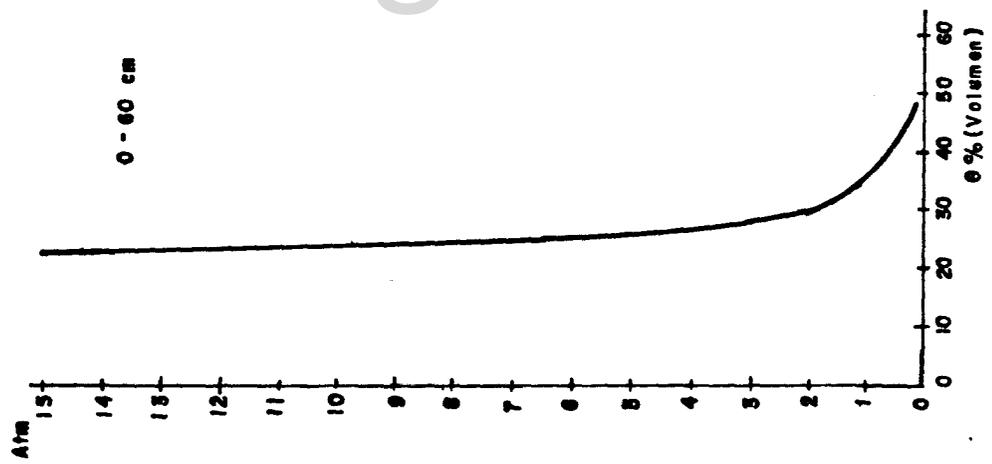
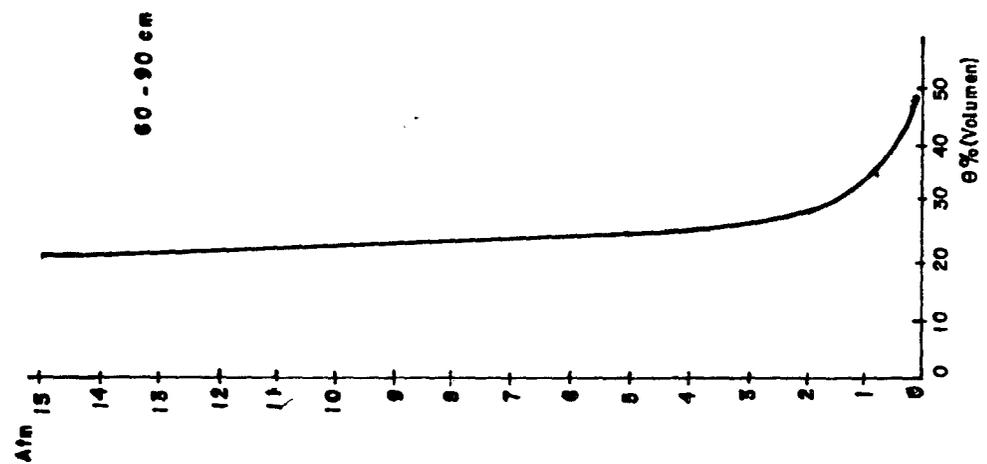
Muestra	Atmósferas							
	Prof. cm	1/10	1/3	1	3	7	10	15
41 C de C	0-30	47,8	35,4	30,8	27,1	22,6	21,5	19,7
	30-60	49,3	38,0	33,1	29,3	23,9	22,7	20,1
29 C de C	0-30	61,6	48,7	46,6	40,1	34,5	32,8	29,6
	30-60	58,8	51,4	43,8	38,2	34,8	31,4	29,9
	60-90	55,9	48,8	41,3	36,6	33,9	31,0	28,5
23 B SIC	0-60	50,4	42,2	34,8	28,2	25,8	23,3	22,9
	60-90	49,4	41,5	33,4	28,4	24,8	22,0	20,7

www.bdigital.ula.ve



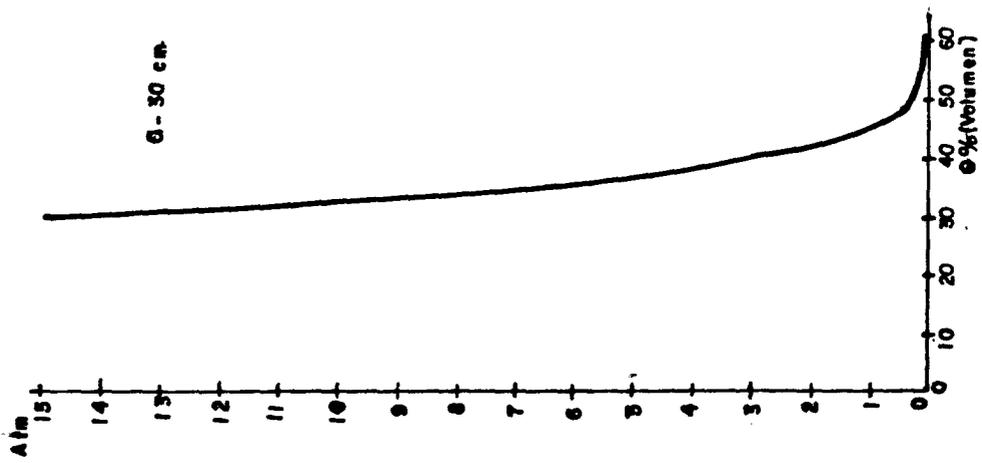
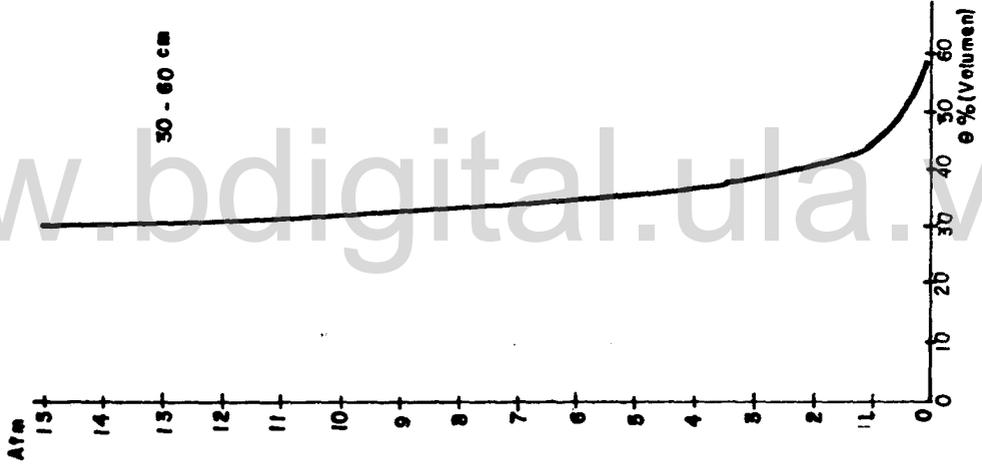
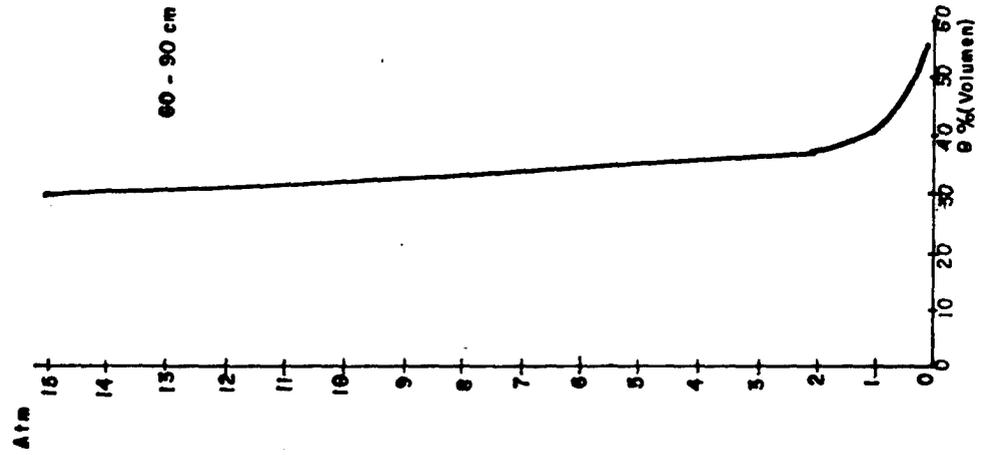
Curvo de retención de humedad 41 C. de C.

www.bdigital.ula.ve



Curva de retención de humedad 23B

www.bdigital.ula.ve



Curva de retención de humedad 44A

A P E N D I C E 2

Pruebas de Infiltración

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

Prueba de Infiltración 29B

Fecha 18-04-88

Prueba A

Tiempo Parcial min	Tiempo acumulado min	Lámina Parcial cm	Lámina acumulada cm
0	0	-	-
2	2	0,7	0,7
2	4	0,7	1,4
6	10	1,7	3,1
10	20	2,2	5,3
10	30	2,6	7,9
15	45	3,7	11,6
15	60	2,9	14,5
30	90	5,5	20,0
30	120	5,2	25,2
30	150	4,9	30,1
30	180	4,0	34,1
30	210	4,2	38,3
30	240	3,7	42,0

$$I_{cum} = 0,42 t^{0,85} \text{ cm}$$

$$I = 21,4 t^{-0,15} \text{ cm/hr}$$

$$IG = 10,9 \text{ cm/h}$$

Prueba de Infiltración 29 B

Fecha 18-04-88

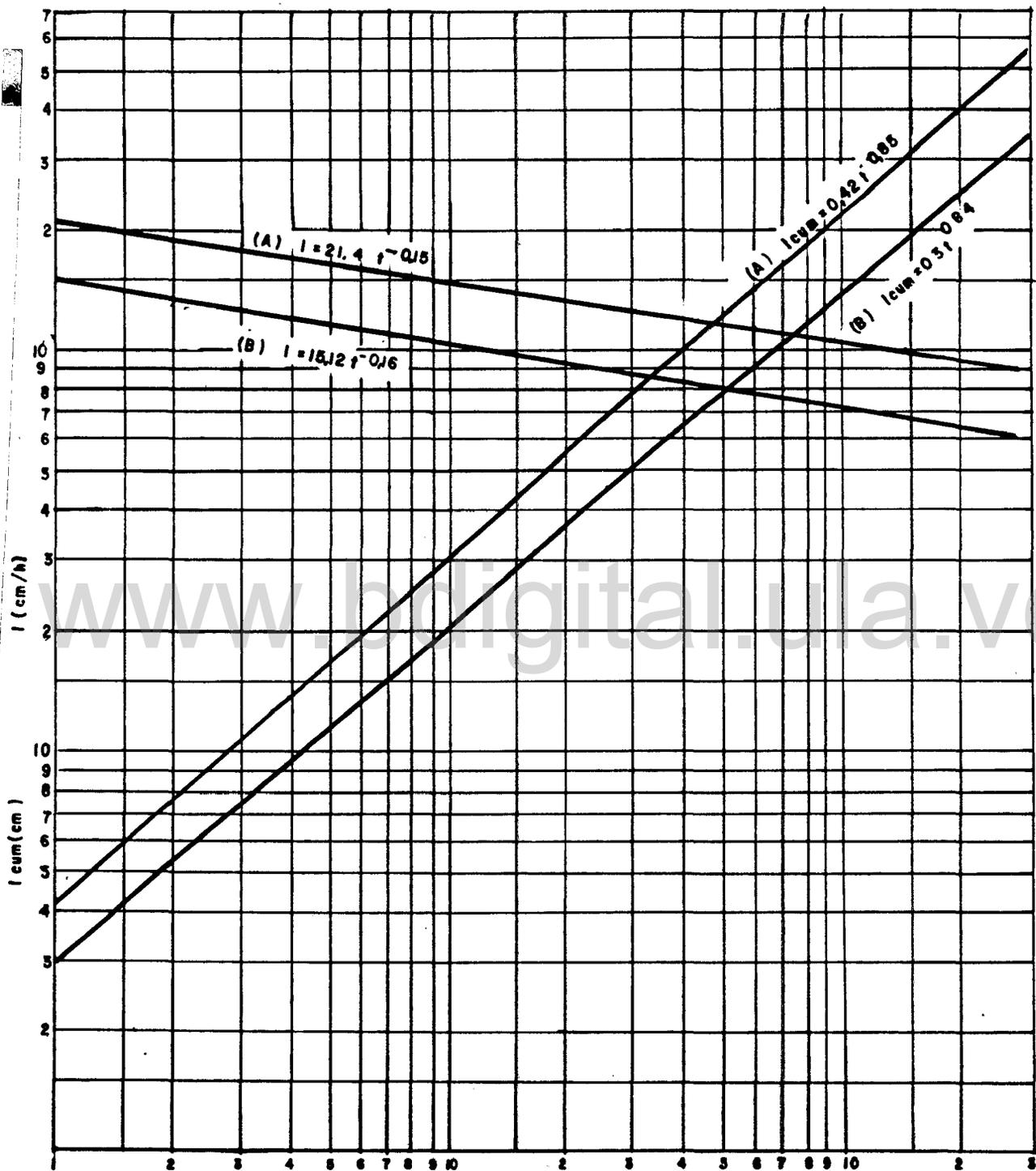
Prueba B

Tiempo Parcial min	Tiempo acumulado min	Lámina Parcial cm	Lámina Acumulado cm
0	0	-	-
	2	0,5	0,5
	4	0,5	1,0
	10	0,9	1,9
	20	1,8	3,7
	30	1,3	5,0
	45	3,0	8,0
	60	1,1	9,1
	90	2,9	12
	120	4,7	16,7
	150	3,3	20,0
	180	3,5	23,5
	210	3,3	26,8
	240	3,2	30

$$I_{cum} = 0,30 t^{0,84} \text{ cm}$$

$$I = 15,12 t^{-0,16} \text{ cm/hr}$$

$$IG = 7,28 \text{ cm/hr}$$



t (minutos)
Prueba de infiltración 298

Prueba de Infiltración 75 A C de C

Fecha 20-04-88

Prueba A

Tiempo Parcial min	Tiempo Acumulado min	Lámina Parcial cm	Lámina Acumulado cm
0	0	0	0
2	2	0,8	8
2	4	0,5	1,3
6	10	1,4	2,7
10	20	2,3	5,0
10	30	2,0	7,0
15	45	4,0	11
15	60	2,0	13
30	90	5,0	18
30	120	6,0	24
30	150	7,0	31
30	180	8,0	39
60	240	9,0	48

$$I_{cum} = 0,42 t^{0,83}$$

$$I = 20,41 t^{-0,17} \text{ cm/hr}$$

$$t_b = 102 \text{ min}$$

$$I_b = 9,29 \text{ cm/hr}$$

Prueba de Infiltración 75 A C de C

Fecha 20-04-88

Prueba B

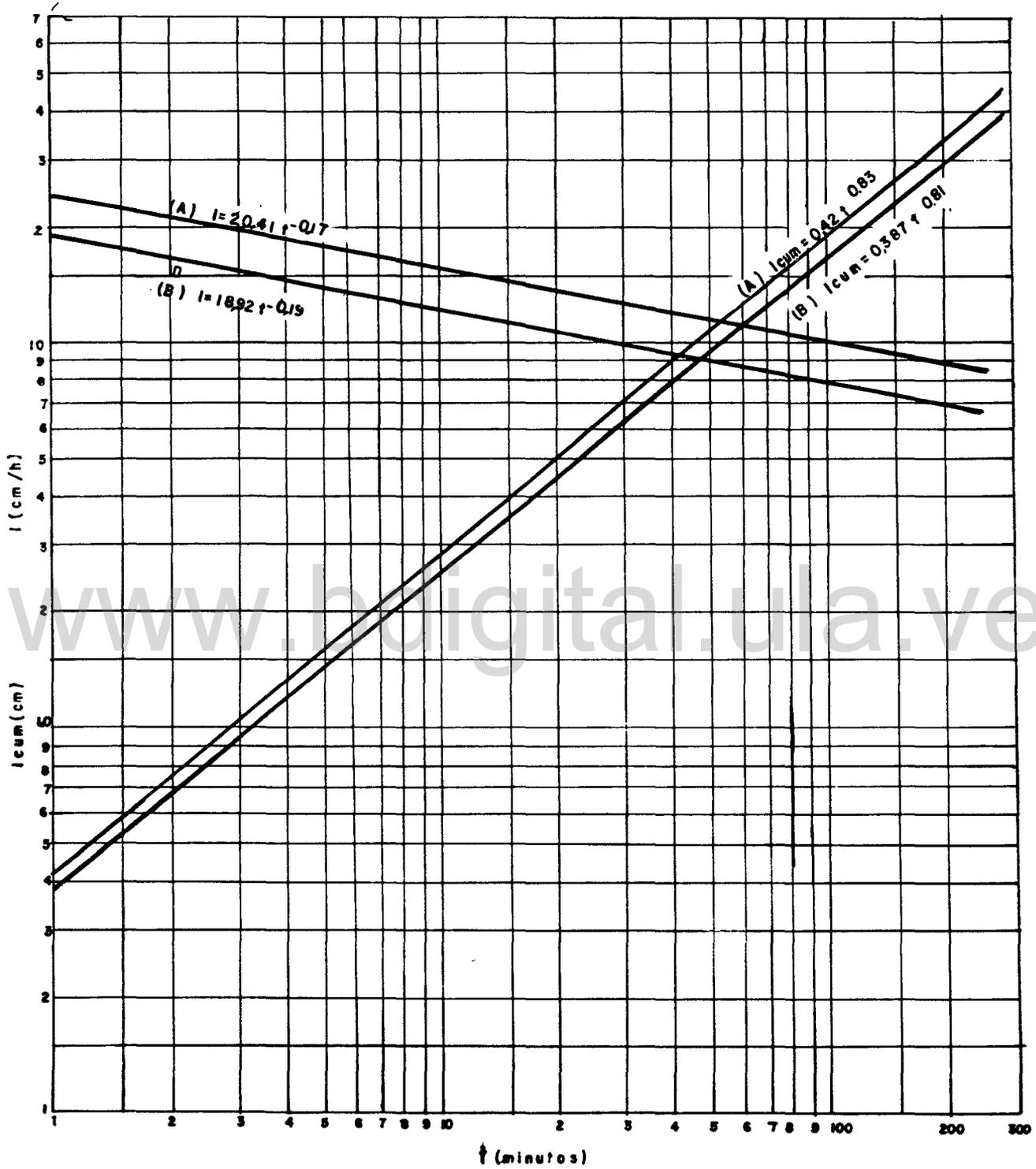
Tiempo Parcial min	Tiempo Acumulado min	Lámina Parcial cm	Lámina Acumulado cm
0	0	-	-
2	2	0,7	0,7
2	4	0,5	1,2
6	10	0,9	2,1
10	20	2,1	4,2
10	30	1,9	6,1
15	45	2,5	8,6
15	60	2,4	11,0
30	90	3,7	14,7
30	120	4,5	19,2
30	150	3,7	22,9
30	180	4,2	27,1
60	240	7,1	34,2

$$I_{cum} = 0,387 t^{0,91} \text{ cm}$$

$$I = 18,92 t^{-0,09} \text{ cm/hr}$$

$$t_b = 102 \text{ min}$$

$$i_b = 7,92 \text{ cm/hr}$$



Prueba de infiltración 75A C.de C

Prueba de Infiltración 23A SIC

Fecha 20-04-88

Prueba A

Tiempo Parcial min	Tiempo Acumulado min	Lámina Parcial mm	Lámina Acumulado mm
0	0	-	-
2	2	4,5	4,5
2	4	2,9	7,4
6	10	6,4	13,8
10	20	5,1	18,9
10	30	3,7	22,6
15	45	6,5	29,1
15	60	5,4	34,5
15	75	4,7	39,2
15	90	2,6	41,8
30	120	4,0	45,8
30	150	3,6	49,4
30	180	3,9	53,3

$$I_{cum} = 3,4 t^{0,55}$$

$$I = 112,2 t^{-0,45} \text{ cm/hr}$$

$$t_b = 270 \text{ min}$$

$$I_b = 9,0 \text{ cm/hr}$$

Prueba de Infiltración 23A

Fecha 20-04-88

Prueba B

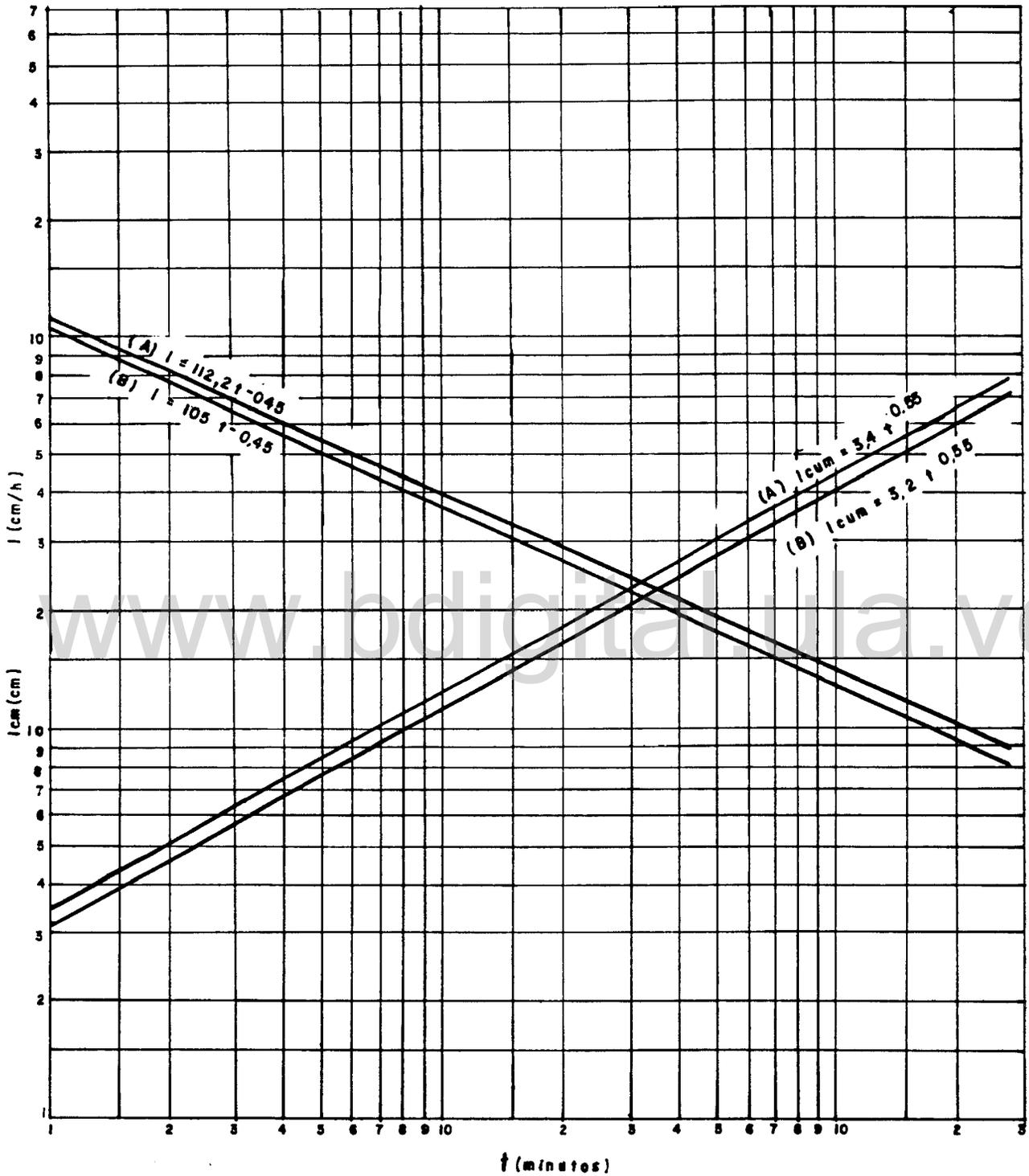
Tiempo Parcial min	Tiempo Acumulado min	Lámina Parcial mm	Lámina Acumulado mm
0	0	-	-
2	2	3,0	3,0
2	4	2,1	5,1
6	10	4,6	10,7
10	20	6,1	16,8
10	30	5,0	21,8
15	45	6,1	27,9
15	60	4,8	32,7
15	75	4,5	37,2
15	90	3,4	40,6
30	120	6,8	47,4
15	135	2,4	49,8
15	150	2,7	52,5
30	180	4,7	57,2

$$I_{cum} = 3,2 t^{0,55} \text{ cm}$$

$$I = 105 t^{-0,45} \text{ cm/h}$$

$$t_b = 270 \text{ min}$$

$$I_b = 8,45 \text{ cm/hr}$$



Prueba de infiltración 23 A S.I.C.

www.bdigital.ula.ve

A P E N D I C E 3

Pruebas realizadas en las subunidades de riego, referente a caudales y presiones

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

Datos de caudal - presión

Tablón 25 B

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/3 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	0,90	1,05	0,98	0,90
1/3	1,20	1,24	1,20	1,28
2/3	1,60	1,54	1,60	1,58
Final	1,24	1,20	1,24	2,10
Presión	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)
Entrada	5,28 (7,5)	5,28 (7,5)	4,93 (7)	4,93 (7)
Final	4,23 (6)	4,23 (6)	4,58 (6,5)	4,58 (6,5)
Pérdida de carga (%)	20	20	7	7

Lateral de mínima presión de entrada (CMPE) de todas las múltiples operando.

Múltiple	25 B	25 C	25 A
Presión (m)	4,93 (7)	3,52 (5)	7,39 (10,5)
	3,87 (5,5)	2,11 (3)	5,98 (8,5)

Prom LMPE = 4,63

Min LMPE = 4,93

$$q_n = 0,96 \text{ l/h}$$

$$\Delta H_s = 0,7 \text{ m}$$

$$q_a = 1,30 \text{ l/h}$$

$$h_a = 4,86 \text{ m}$$

Datos de caudal - presión

Tablón 65

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (l/h)	1/3 abajo (l/h)	2/3 abajo (l/h)	Final (l/h)
Entrada	1,31	1,35	1,43	1,35
1/3	1,40	1,70	1,76	2,25
2/3	1,61	1,28	1,20	1,65
Final	1,50	1,30	1,50	3,25
Presión	m	m	m	m
Entrada	7,04 (10)	7,04 (10)	7,04 (10)	7,04 (10)
Final	6,33 (9)	6,69 (9,5)	6,33 (9)	6,69 (9,5)
Pérdida de carga (%)	10	5	10	5

Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) de todas las múltiples operando.

Múltiple	65	64	63	62
Presión (m)	7,04 (10)	7,04 (10)	4,23 (6)	3,87 (5,5)
	7,04 (10)	7,04 (10)	5,63 (8)	2,82 (4,0)

Prom. LMPE (m) = 5,59

Min LMPE (m) = 7,04

$$q_n = 1,27 \text{ l/h}$$

$$\Delta H_s = 0,35 \text{ m}$$

$$q_a = 1,62 \text{ l/h}$$

$$h_a = 6,83 \text{ m}$$

Datos de caudal - presión

Tablón 62

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/3 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	1,15	1,69	1,95	1,30
1/3	1,10	1,61	1,25	1,05
2/3	1,25	2,14	1,50	1,10
Final	1,35	1,80	1,98	1,24
Presión	m	m	m	m
Entrada	4,93	4,22	4,23	3,87
Final	4,58	3,87	3,87	3,17
Pérdida de carga (%)	7	8	8	18

Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) de todas las múltiples operando.

Múltiple	65	64	63	62
Presión (m)	7,04 (10)	7,04 (10)	4,23 (6)	3,87 (5,5)
	7,04 (10)	7,04 (10)	5,63 (8)	2,82 (4)
Prom. LMPE (m)	5,63			
Min LMPE (m)	3,87			
$q_n =$	1,09 1/h	$\Delta H_s = 1,76$		
$q_a =$	1,46 1/h	$h_a = 3,87$		

Datos de caudal - presión

Tablón 29 B

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/2 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	1,39	2,18	1,05	1,05
1/3	0,98	1,65	1,43	1,43
2/3	2,00	1,58	1,28	1,58
Final	1,16	1,99	1,43	1,73
Presión	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)
Entrada	6,34 (9,0)	6,34 (9)	6,34 (9)	6,34 (9,0)
Final	5,63 (8)	5,63 (8)	5,63 (8)	4,93 (7,0)
Pérdida de carga (%)	11	11	11	22

Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) de todas las múltiples operando.

Múltiple

Presión (m)	5,63 (8)	6,34 (9)	5,63 (8)	5,63 (8)
	5,63 (8)	7,04 (10)	5,63 (8)	5,63 (8)
Prom LMPE (m)	5,90			
Min LMPE (m)	6,34			

$$q_n = 1,06 \text{ 1/h} \quad \Delta H_s = 1,41 \text{ m}$$

$$q_a = 1,49 \text{ 1/h} \quad h_a = 5,49 \text{ m}$$

Datos de caudal - presión

Tablón 75 A

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/3 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	1,20	1,88	1,69	1,39
1/3	1,50	1,09	0,98	1,20
2/3	0,23	1,47	0,64	1,09
Final	1,39	2,21	1,73	1,65
Presión	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)
Entrada	6,33 (9)	5,63 (8)	5,63 (8)	4,58 (6,5)
Final	5,99 (8,5)	4,93 (7)	5,28 (7,5)	4,22 (6,0)
Pérdida de carga (%)	5	12	6	8

Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) de todas las múltiples operando.

Múltiple

Presión (m)	4,58 (6,5)	4,23 (6,0)	4,93 (7,0)
Prom LMPE (m)	4,58		
Mín LMPE (m)	4,58		

$$q_n = 0,74 \text{ l/h} \quad \Delta H_s = 2,11 \text{ m}$$

$$q_a = 1,33 \text{ l/h}$$

Datos de caudal - presión

Tablón 76 A

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/3 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	1,01	1,50	2,48	0,86
1/3	1,35	1,16	0,28	1,00
2/3	1,73	1,58	0,49	0,98
Final	1,35	1,88	1,13	0,86
Presión	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)
Entrada	5,63 (8)	5,63 (8)	2,82 (4,0)	2,82 (4,0)
Final	4,93 (7)	2,46 (3,5)	2,82 (4,0)	2,46 (3,5)
Pérdida de carga (%)	12	56	0	13

Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) a todas las múltiples operando.

Múltiple	76 B	76 B
Presión (m)	2,82 (4,0)	3,52 (5)
Prom LMPE (m)	3,17	
Min LMPE (m)	2,82	
$q_n =$	0,62 1/h	$\Delta H_s = 3,17$ m
$q_a =$	1,23 1/h	$h_a = 3,73$ m

Datos de caudal - presión

Tablón 34 B

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/3 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	1,54	1,39	1,70	1,50
1/3	1,13	1,88	1,60	1,45
2/3	1,50	1,20	1,50	1,35
Final	0,98	1,05	1,25	0,75
Presión	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)
Entrada	5,63 (8)	5,63 (8)	5,63 (8)	3,58 (5)
Final	4,93 (7)	5,28 (7,5)	5,28 (7,5)	3,16 (4,5)
Pérdida de carga (%)	12	6	6	10

Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) a todas las múltiples operando

Múltiple	41 B	41 B	41 A	41 A
Presión (m)	7,75 (11)	7,04 (10)	7,04 (10)	7,74 (11)

Prom LMPE (m) 6,62

Min LMPE (m) 3,52

$$q_n = 0,98 \text{ 1/h} \quad \Delta H_s = 2,47 \text{ m}$$

$$q_a = 1,36 \text{ 1/h} \quad h_a = 3,46 \text{ m}$$

Datos de caudal - presión

Tablón 41 B

Localización salida sobre el lateral	Localización del lateral en la múltiple			
	Entrada (1/h)	1/3 abajo (1/h)	2/3 abajo (1/h)	Final (1/h)
Entrada	1,73	1,73	1,69	1,76
1/3	0,90	2,29	1,50	0,68
2/3	1,80	1,73	1,01	1,20
Final	2,63	0,90	1,58	1,20
Presión	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)	m (PSI)
Entrada	7,75 (11)	7,75 (11)	7,04 (10)	7,75 (11)
Final	7,04 (10)	7,04 (10)	7,04 (10)	7,04 (10)
Pérdida de carga (%)	9	9	0	9
Lateral de mínima presión de entrada (LMPE) a todas las múltiples operando				
Múltiple	41 B	41 A	41 A	34 A
Presión	7,04 (10)	7,04 (10)	7,75 (11)	3,52 (5)
Prom LMPE (m)	6,62			
Min LMPE (m)	7,75			
$q_n =$	0,87 1/h	$\Delta H_s = 0,71 \text{ m}$		
$q_a =$	1,52 1/h	$h_a = 7,32 \text{ m}$		

A P E N D I C E 4

Información climatológica

Evapotranspiración del cultivo de referencia, E_{To}

Evapotranspiración máxima del cultivo, E_{Tm} , diario

para el cultivo de la caña de azúcar

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

CLIMATOLOGIA Y METEOROLOGIA

ESTACION METEOROLOGIA - S.A. CLP.
DEL 01/03/88 AL 31/03/88

FECHA	LLUVIA m.m.	EVAPORACION m.m.	TEMPERATURA				HUMEDAD RELATIVA			HORAS DE SOL	VIENTO		NUBES (OCTAVOS)		ACUMULADOS DE LLUVIA	
			MAX q C	MINI q C	MEDIA q C	OSC q C	0:00	14:00	\bar{x}		REC. km.	V. MED km/h	0:00	14:00	MES mm	AO mm
3 1	16.50	2.60	29.00	20.50	24.75	8.50	88	50	69.00	2.50	72.20	3.01	4.00	8.00	16.50	120.00
3 2	0.00	3.05	29.50	21.00	25.25	8.50	87	48	67.50	4.95	69.00	2.87	8.00	4.00	16.50	120.00
3 3	0.00	4.95	32.00	19.50	25.75	12.50	90	50	70.00	8.30	77.00	3.22	2.00	3.00	16.50	120.00
3 4	0.00	5.70	33.50	19.00	26.25	14.50	90	33	61.50	8.50	78.60	3.27	4.00	1.00	16.50	120.00
3 5	0.00	5.85	30.50	20.50	25.50	10.00	92	45	68.50	7.95	70.20	2.92	6.00	2.00	16.50	120.00
3 6	0.00	5.50	32.00	18.00	25.00	14.00	85	35	60.00	8.70	75.50	3.14	6.00	1.00	16.50	120.00
3 7	0.00	5.85	32.50	20.50	26.50	12.00	77	42	59.50	9.05	80.60	3.36	2.00	2.00	16.50	120.00
3 8	0.00	5.50	32.50	20.50	26.50	12.00	77	42	59.50	9.05	80.60	3.36	2.00	2.00	16.50	120.00
3 9	0.00	6.95	32.50	20.50	26.50	12.00	79	36	57.50	8.55	88.60	3.69	2.00	1.00	16.50	120.00
3 10	0.00	6.55	33.00	20.50	26.75	12.50	80	27	53.50	9.60	88.70	3.69	1.00	1.00	16.50	120.00
3 11	0.00	6.80	33.50	20.50	27.00	13.00	88	39	63.50	8.90	78.30	3.26	1.00	1.00	16.50	120.00
3 12	0.00	6.10	31.50	20.50	26.00	11.00	80	45	62.50	6.90	70.70	2.95	2.00	3.00	16.50	120.00
3 13	0.20	4.95	32.00	20.50	26.25	11.50	83	45	64.00	7.00	68.00	2.83	5.00	1.00	16.70	120.20
3 14	0.60	6.85	34.50	21.50	28.00	13.00	86	43	64.50	9.00	79.30	3.30	3.00	0.00	17.30	120.80
3 15	1.70	5.80	34.00	22.00	28.00	12.00	86	46	66.00	6.85	84.70	3.53	6.00	1.00	19.00	122.50
3 16	0.00	5.60	33.50	21.00	27.25	12.50	87	39	63.00	5.60	78.30	3.26	8.00	3.00	19.00	122.50
3 17	0.00	5.95	33.50	20.50	27.00	13.00	84	41	62.50	6.60	72.80	3.03	8.00	1.00	19.00	122.50
3 18	0.00	6.75	36.00	17.50	26.75	18.50	83	23	53.00	9.25	91.00	3.79	3.00	1.00	19.00	122.50
3 19	0.00	7.95	35.50	19.00	27.25	16.50	92	17	54.50	9.55	80.40	3.35	2.00	1.00	19.00	122.50
3 20	0.00	6.30	34.50	18.50	26.50	16.00	87	33	60.00	8.50	71.70	2.99	2.00	1.00	19.00	122.50
3 21	0.00	7.35	37.50	20.50	29.00	17.00	90	15	52.50	9.45	88.90	3.70	2.00	1.00	19.00	122.50
3 22	0.00	7.10	36.00	21.00	28.50	15.00	93	32	62.50	8.15	98.00	4.08	4.00	1.00	19.00	122.50
3 23	0.00	7.70	35.00	20.00	27.50	15.00	75	28	51.50	9.50	105.80	4.41	1.00	1.00	19.00	122.50
3 24	0.00	6.55	34.50	18.50	26.50	16.00	79	26	52.50	8.85	82.00	3.42	2.00	2.00	19.00	122.50
3 25	0.00	7.00	34.00	18.00	26.00	16.00	93	33	63.00	9.40	94.40	3.93	2.00	1.00	19.00	122.50
3 26	0.00	9.30	33.50	20.50	27.00	13.00	80	40	60.00	8.50	88.50	3.68	1.00	1.00	19.00	122.50
3 27	0.00	7.05	34.50	20.00	27.25	14.50	85	45	65.00	8.80	87.50	3.64	3.00	1.00	19.00	122.50
3 28	0.00	6.65	35.00	22.50	28.75	12.50	84	44	64.00	6.95	103.90	4.32	8.00	1.00	19.00	122.50
3 29	0.00	7.05	34.50	22.00	28.25	12.50	86	50	68.00	4.45	75.70	3.15	8.00	2.00	19.00	122.50
3 30	2.70	6.05	34.00	20.50	27.25	13.50	86	47	66.50	5.95	71.30	2.97	7.00	1.00	21.70	125.20
3 31	21.60	7.70	34.50	21.50	28.00	13.00	90	48	69.00	7.60	80.30	3.37	2.00	1.00	43.30	146.80
TOTALES :	43.30	194.05	1038.50	427.00	832.75	411.50	2642	1187	1914.50	242.90	2533.00	105.49	117.00	51.00	43.30	146.80
PROMEDIO :	1.40	6.26	33.50	20.23	26.84	13.27	85.23	38.29	61.76	7.84	81.71	3.40	3.77	1.65		

LLUVIA
ACUMULADO AL : 31/03/88 146.80 mm

AL : 31/03/87 221.20 mm

Evapotranspiración del cultivo de referencia Eto, por el método de Penman para el mes de Marzo.

Día	α	n/N	Ra mm/día	Rs mm/día	ea mbar	HR %	U ₂ km/día	f(t)	W	C	ET ₀ mm/día
1	0,22	0,30	15,3	6,12	32,1	69,00	72,2	15,6	0,75	0,98	4,08
2	0,22	0,30	15,3	6,12	33,1	67,50	69,00	15,7	0,75	0,98	4,15
3	0,22	0,73	15,3	9,41	35,2	70,00	77,00	15,8	0,76	0,99	5,63
4	0,22	0,73	15,3	9,41	36,9	61,50	78,60	16,0	0,76	1,10	6,62
5	0,22	0,55	15,3	8,03	33,9	68,50	70,20	15,8	0,76	1,06	5,33
6	0,22	0,63	15,3	8,64	34,1	60,00	75,50	15,7	0,77	1,09	6,04
7	0,22	0,75	15,3	9,56	36,6	59,50	80,60	16,0	0,77	0,98	6,00
8	0,22	0,75	15,3	9,56	36,6	59,50	80,60	16,0	0,77	0,98	6,00
9	0,22	0,80	15,3	9,94	36,6	57,50	88,60	16,0	0,77	1,10	7,04
10	0,22	0,85	15,3	10,33	37,2	53,50	88,70	16,1	0,77	1,10	7,36
11	0,22	0,85	15,3	10,33	38,0	63,50	78,30	16,1	0,77	1,11	7,12
12	0,22	0,72	15,3	9,33	35,2	62,50	70,70	15,9	0,76	1,10	6,36
13	0,22	0,65	15,3	8,80	35,9	64,00	68,00	16,0	0,76	1,09	6,05
14	0,22	0,80	15,3	9,94	40,2	64,50	79,30	16,3	0,78	1,08	6,87
15	0,22	0,63	15,3	8,64	39,8	66,50	84,70	16,3	0,78	1,08	6,22
16	0,22	0,85	15,3	10,33	40,2	69,00	80,80	16,3	0,84	1,12	7,23

C.A. CENTRAL LA PASTORA
 DPTO. DE INVESTIGACIONES
 SECCION: HIDROLOGIA Y METEOROLOGIA

Estación Meteorológica C.A.CLP.
 del 01/04/88 al 30/04/88

Fecha	Lluvia mm	Temperatura				Humedad relativa			Horas de sol	Viento		Nubes (Octavos)		Acumulados de lluvia		
		Evaporac.	Max	Min	Media	OSC	X			Rec.	V. Med.	8:00	14:00	mm	mm	
		mm	°C	°C	°C	°C	8:00	14:00		X	km	km	8:00	14:00	mm	mm
4 1	0,00	4,80	31,00	22,00	26,50	9,00	74	43	58,50	5,20	61,40	2,56	8,00	1,00	0,00	146,80
4 2	0,00	7,00	33,00	23,00	28,00	10,00	80	45	62,50	6,20	74,30	3,09	8,00	1,00	0,00	146,80
4 3	6,60	1,70	30,50	22,50	26,50	8,00	82	90	86,00	2,65	63,20	2,63	8,00	7,00	6,60	153,40
4 4	0,00	4,10	31,50	20,50	26,00	11,00	90	45	67,50	4,70	60,80	2,53	5,00	7,00	6,62	153,40
4 5	0,00	4,65	32,50	23,00	27,75	9,50	89	48	68,50	4,00	60,90	2,54	7,00	1,00	6,60	153,40
4 6	0,00	1,90	30,00	23,50	26,75	6,50	83	53	68,00	0,35	37,20	1,55	8,00	6,00	6,60	153,40
4 7	0,00	1,85	27,50	21,00	24,25	6,50	92	73	82,50	0,50	55,10	2,30	8,00	8,00	6,60	153,40
4 8	5,10	4,00	32,50	21,50	27,00	11,00	88	50	69,00	5,45	74,40	3,10	5,00	1,00	11,70	158,50
4 9	0,00	2,15	27,50	21,00	24,25	6,50	86	58	72,00	0,75	63,80	2,66	8,00	6,00	11,70	158,50
4 10	0,00	2,15	27,50	21,00	24,25	6,50	86	58	72,00	1,50	72,20	3,01	6,00	8,00	11,70	158,50
4 11	0,00	5,15	33,00	19,50	26,25	13,50	75	48	61,50	5,40	80,80	3,36	3,00	3,00	11,70	158,50
4 12	5,00	1,75	30,00	21,00	25,50	9,00	92	77	84,50	2,70	58,00	2,41	7,00	8,00	16,70	163,50
4 13	24,00	6,20	32,00	21,00	26,50	11,00	88	51	69,50	7,35	77,70	3,23	5,00	1,00	40,70	187,50
4 14	5,00	4,45	32,50	21,00	26,75	11,50	88	51	69,50	8,20	62,10	2,59	8,00	1,00	45,70	192,50
4 15	0,00	2,90	31,00	21,50	26,25	9,50	83	47	65,00	6,95	61,50	2,56	6,00	2,00	45,70	192,50
4 16	4,60	5,85	33,00	21,50	27,25	11,50	72	45	58,50	9,25	67,70	2,82	1,00	1,00	50,30	197,10
4 17	0,00	6,25	33,50	22,50	28,00	11,00	74	42	58,00	10,25	66,20	2,76	1,00	1,00	50,30	197,10
4 18	0,00	6,70	34,50	22,00	28,25	12,50	82	42	62,00	8,60	71,50	2,98	2,00	1,00	50,30	197,10
4 19	0,00	7,50	33,50	22,00	27,75	11,50	96	50	73,00	9,70	61,80	2,57	1,00	1,00	50,30	197,10
4 20	0,00	6,80	34,00	21,50	27,75	12,50	90	45	67,50	7,70	74,50	3,10	6,00	1,00	50,30	197,10
4 21	0,00	6,05	33,50	23,00	28,25	10,50	92	47	69,50	9,35	74,00	3,08	1,00	1,00	50,30	197,10
4 22	0,00	5,75	32,50	22,00	27,25	10,50	80	42	61,00	7,90	74,60	3,10	4,00	1,00	50,30	197,10
4 23	0,00	6,85	33,00	21,50	27,25	11,50	83	45	64,00	8,00	75,40	3,14	8,00	1,00	50,30	197,10
4 24	0,00	4,90	32,00	22,00	27,00	10,00	80	44	62,00	7,55	88,00	3,66	8,00	1,00	50,30	197,10
4 25	0,00	6,05	33,50	22,00	27,75	11,50	85	47	66,00	8,50	66,30	2,76	2,00	1,00	50,30	197,10
4 26	0,00	6,25	34,00	22,00	28,00	12,00	87	38	62,50	7,15	67,30	2,80	6,00	1,00	50,30	197,10
4 27	0,00	6,25	34,00	22,00	28,00	12,00	90	45	67,50	6,45	75,50	3,15	4,00	1,00	50,30	197,10
4 28	0,00	6,25	32,00	23,00	27,50	9,00	91	54	72,50	5,85	61,40	2,56	2,00	2,00	50,30	197,10
4 29	0,00	6,25	31,50	23,00	27,25	8,50	80	43	61,50	5,60	59,80	2,49	8,00	3,00	50,30	197,10
4 30	0,00	5,70	31,50	23,00	27,25	8,50	80	51	65,50	4,25	66,10	2,76	2,00	2,00	50,30	197,10
Totales:	50,30	148,15	958,00	656,00	807,00	302,00	2538	1517	2027,50	178,00	2013,50	83,84	156,00	80,00	50,30	197,10
Promed.	1,68	4,94	31,93	21,87	26,90	10,07	84,60	50,57	67,58	5,93	67,12	2,79	5,20	2,67		
Lluvia																
Acumulado al:	30/04/88															197,10
Año anterior:	30/04/87															267,80

Evapotranspiración del cultivo de referencia ETo, por el método de Penman para el mes de Abril.

Día	α	n/N	Ra mm/día	Rs mm/día	ea mbar	HR %	U ₂ km/día	f(t)	W	C	ETo mm/día
23	0,22	0,65	15,6	8,80	35,2	64,00	75,40	16,2	0,77	1,10	6,21
24	0,22	0,65	15,6	8,80	35,2	62,00	88,00	16,1	0,77	1,10	6,43
25	0,22	0,80	15,6	9,95	37,3	66,00	66,30	16,3	0,78	1,10	6,77
26	0,22	0,63	15,6	8,64	37,8	62,50	67,30	16,3	0,78	1,10	6,27
27	0,22	0,73	15,6	9,41	37,8	67,50	75,50	16,3	0,78	1,10	6,58
28	0,22	0,75	15,6	9,56	36,8	72,50	61,40	16,2	0,78	1,10	6,38

Datos de evapotranspiración máxima $ET_{m\acute{a}x}$, diario para el cultivo de la caña de azúcar.

Tablón	Edad días	Fecha	Kc	ET_o mm/día	$ET_{m\acute{a}x}$ mm/día	$Et_{m\acute{a}x}$ 3 días
23 B	23 B	01 - 03	1,05	4,08	4,3	
		02 - 03	1,05	4,15	4,4	
		03 - 03	1,05	5,63	5,9	14,6
25 B	23	05 - 03	0,50	5,33	2,7	
		06 - 03	0,50	6,04	3,0	
		07 - 03	0,50	6,00	3,00	8,7
65	30	06 - 03	0,50	6,04	3,02	
		07 - 03	0,50	6,00	3,00	
		08 - 03	0,50	6,00	3,00	9
62	16	09 - 03	0,50	7,04	3,52	
		10 - 03	0,50	7,36	3,68	
		11 - 03	0,50	7,12	3,56	10,76
29 B	217	13 - 03	1,05	6,05	6,4	
		14 - 03	1,05	6,87	7,2	
		15 - 03	1,05	6,22	6,5	20,1
75 A	54	14 - 03	0,80	6,87	5,50	
		15 - 03	0,80	6,22	4,98	
		16 - 03	0,80	7,23	5,78	16,26
76 A	47	24 - 04	0,80	6,43	5,1	
		25 - 04	0,80	6,77	5,4	
		26 - 04	0,80	6,27	5,1	15,6
41 B	95	25 - 04	1,00	6,77	6,77	
		26 - 04	1,00	6,27	6,27	
		27 - 04	1,00	6,58	6,58	19,7
34 A	60	25 - 04	0,80	6,77	5,4	
		26 - 04	0,80	6,27	5,0	
		27 - 04	0,80	6,58	5,3	15,7