

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Primera etapa**

#### **4.1.1. Variables climatológicas**

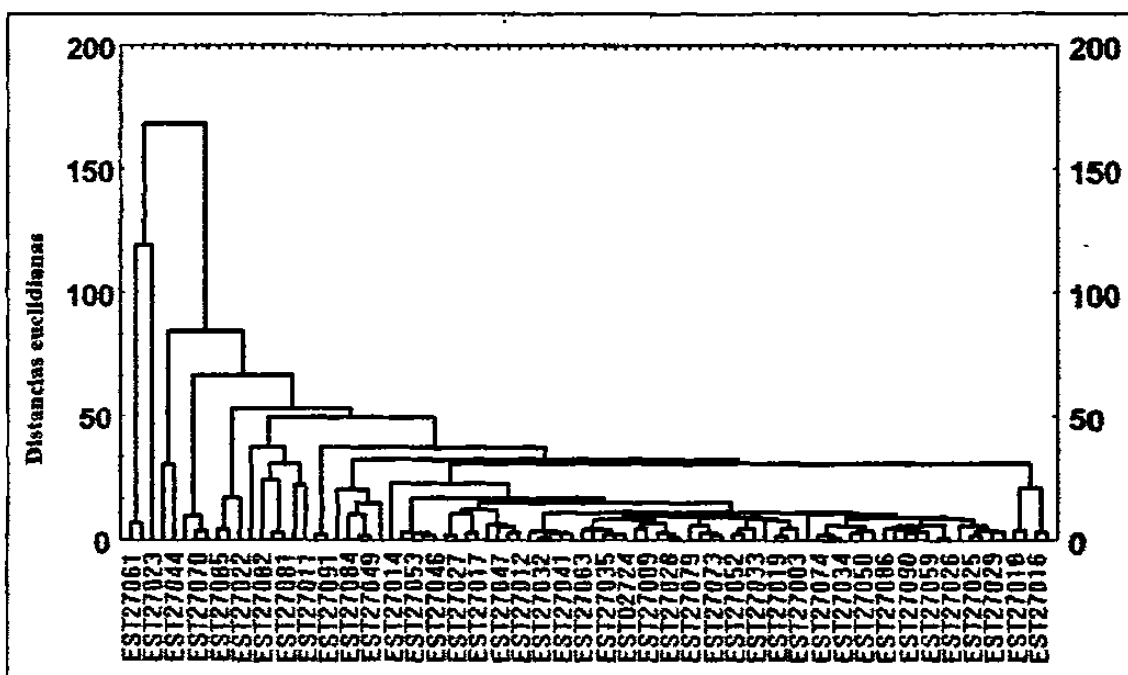
##### **4.1.1.1. Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso**

En la Planicie Aluvial Tabasqueña la precipitación promedio máxima diaria del período más lluvioso generalmente se presenta en el mes de septiembre variando en el espacio y en el tiempo de acuerdo con el patrón general de circulación atmosférica y factores locales, considerándose a este período como el más crítico al producir daños fisiológicos a los cultivos y pérdidas económicas por el exceso de lluvias. La precipitación promedio diaria del mes de septiembre presenta espacialmente valores más uniformes a lo largo de la Planicie Aluvial (11 mm), mientras que en la cercanía de la región orográfica de la Sierra Madre de Chiapas reciben precipitaciones diarias de hasta 24.34 mm (Cuadro A1), debido a efectos orográficos; sin embargo, el valor normal o promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso para el Estado es de 12.09 mm y 11.53 mm de acuerdo a las estimaciones por los métodos de isoyetas y media aritmética respectivamente (Cuadro 2).

En base al dendograma de las estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco (Figura 20), dos grupos fueron formados a un nivel, con un índice de similitud de 116.6; quedando ubicado un grupo dentro de la Planicie Aluvial y el otro en las estribaciones de la Sierra Madre de Chiapas. El grupo uno asoció la mayoría de las estaciones meteorológicas con bajos índices de similitud, lo que indicó que existe mayor grado de similitud entre estas estaciones (Frontera: Alvaro Obregón, 27016; Miramar: Centla, 27085) por efecto de distribución espacial del promedio de lluvias diarias del mes de septiembre. Estas estaciones meteorológicas se localizan en la parte noreste y centro del Estado y son representativas de las condiciones de longitud y homogeneidad de la serie climática de la Planicie Aluvial Tabasqueña.

**Cuadro 2.** Promedio espacial de la lluvia. Mes de Septiembre. Método de las isoyetas y media aritmética para el Estado de Tabasco.

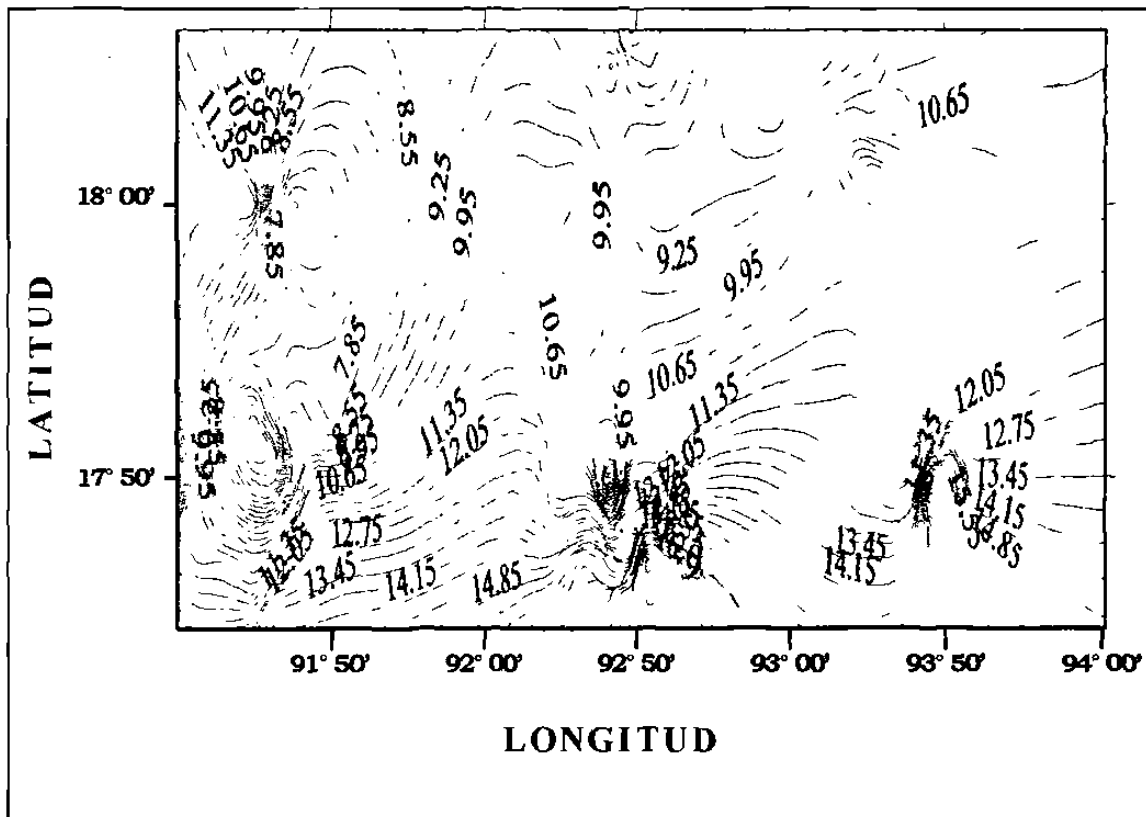
Isoyeta	Lluvia entre isoyeta (mm)	Área (Km) <sup>2</sup>	Lluvia Ponderada (mm)
1	6	148.78	0.036
2	7	241.77	0.068
3	8	464.95	0.150
4	9	1952.79	0.712
5	10	3050.07	1.236
6	11	3961.44	1.766
7	12	6788.28	3.303
8	13	2529.33	1.333
9	14	2306.15	1.309
10	15	1078.68	0.656
11	16	557.94	0.361
12	17	520.74	0.358
13	18	464.95	0.339
14	19	409.15	0.315
15	20	185.98	0.150
Lluvia ponderada			12.09 mm
Media aritmética			11.53 mm



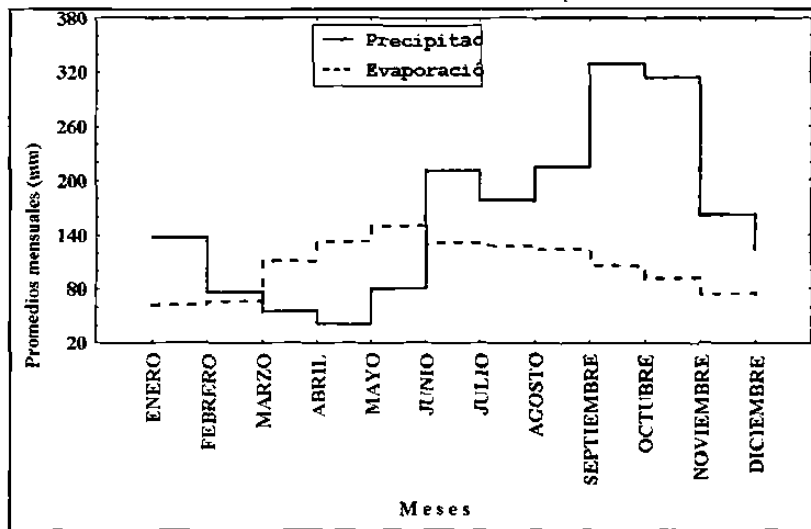
**Figura 20.** Dendrograma de estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco, basándose en distancias euclidianas como índice de similitud.

El grupo dos fusiona las estaciones meteorológicas que se encuentran adyacentes a la región orográfica de la Sierra Madre de Chiapas (Oxolotán: Tacotalpa, 27070; Teapa: Puyacatengo, 27061; Teapa: Teapa, 27044) y se ubican al sur del Estado; estas estaciones reflejan las series climáticas típicas del trópico húmedo lluvioso con condiciones buenas de longitud y homogeneidad en sus datos.

Concordando con Myers (1994), se sustenta que la interpolación con la técnica Kriging favorece ordinariamente la estimación de valores en aquellos sitios donde no se tomaron datos o muestras, lo que concuerda con los resultados obtenidos de las lluvias promedios diarios del mes de Septiembre para el Estado de Tabasco, los cuales no exhibieron substancial fluctuación estructural en la variabilidad espacial temporal. El mapa de isoyetas representa la distribución espacial multidimensional de la variable promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso (Figura 21).



norte, 93° 16' longitud oeste y altitud de 12 msnm; temperatura media mensual de 27.2°C; evaporación mensual de 84.29 mm, precipitación del mes más lluvioso 340 mm que equivale a 16.19% con respecto a la precipitación media anual de 2100 mm. Y la otra de la región orográfica de la Sierra de Chiapas (Teapa, 27044) que se localiza a 17° 33' latitud norte, 92° 58' longitud oeste y altitud de 72 msnm; temperatura media mensual de 25.8°C; evaporación mensual de 58.98 mm, precipitación del mes más lluvioso 600 mm que equivalen a 17.14% con respecto a la precipitación media anual de 3500 mm. En función de los climogramas de Gausson (Figuras 22 y 23) para ambas estaciones se pueden distinguir tres periodos estacionales durante el año: Periodo muy húmedo, de junio a octubre que en el bimestre septiembre-octubre presenta las máximas precipitaciones promedio (650 a 1100 mm, que representan una lámina del 31% con respecto a la lámina total anual); El periodo húmedo de noviembre-enero, durante la cual se presentan lluvias de tipo ciclónico con baja intensidad y duración prolongada y el de estiaje o seco, de febrero-mayo con lluvias menores de 40 hasta 100 mm, que están por debajo de la demanda evaporativa de la atmósfera.



**Figura 22.** Climograma de Gausson. Estación meteorológica Samaria-Cunduacán (27039).

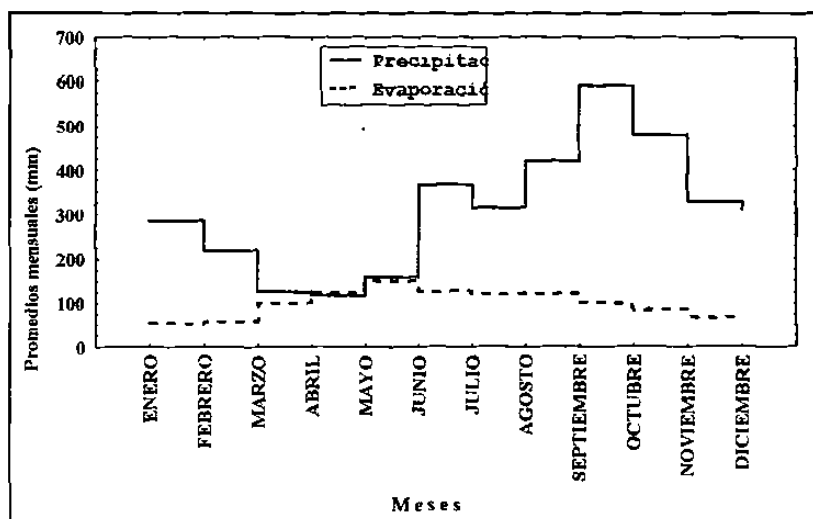


Figura 23. Climograma de Gausсен. Estación meteorológica Teapa (27044).

#### 4.1.1.3. Lluvia de diseño

El análisis de frecuencias de información hidrológica relaciona la magnitud de los eventos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad.

Los registros diarios del mes más lluvioso (Septiembre) para el Estado de Tabasco presentan periodos de recurrencia que varían entre 1 y 24 años.

Chow *et al.* (1994) considera que el periodo de retorno debe ser de 10 años como mínimo, para diseñar y operar sistemas de control de humedad con fines de producción agrícola. Tomando como base el rango de precipitación promedio (12.09 mm) y periodos de retorno de doce años, el Estado de Tabasco presenta dos categorías de lluvias de diseño: una para aplicarse en la Planicie Aluvial (48.37 mm) y otra para aplicarse en áreas adyacentes de la región orográfica de la Sierra Madre de Chiapas (66.17 mm) (Cuadro 3).

#### 4.1.2. Variables agrohidrológicas

##### 4.1.2.1. Profundidad del manto freático con respecto al nivel del terreno

Los problemas del flujo de agua subsuperficial no pueden solucionarse hasta que se conozca lo que sucede en los límites del sistema de flujo de entrada y salida (Crownover *et al.*, 1995) por lo que la red de pozos de observación se extendió más allá de los límites en estudio (colindancias de Chiapas y Campeche).

**Cuadro 3.** Períodos de retorno y de lluvia de diseño para el Estado de Tabasco: Planicie Aluvial Tabasqueña (48.37 mm) y formación orográfica Sierra Madre de Chiapas (66.17 mm).

Período R. (años)	Lluvia D. (mm)	Período R. (años)	Lluvia D. (mm)
0.04		0.05	
0.24		0.16	
0.73		0.48	
2.0		3.02	
3.0		4.03	
8.0		12.1	66.17
8.0		12.1	
12.0	48.37	12.1	
24.0		12.1	

La distribución espacial de los niveles freáticos suministraron información de velocidad de ascenso y descenso del nivel del agua por efecto de la distribución de los gradientes hidráulicos, encontrándose los valores mas bajos en la parte norte de la planicie, por lo que en estas áreas se presentan valores de conductividad hidráulica relativamente altas con respecto a la zona sur de la Planicie; además se identificaron los períodos críticos para los cultivos por efecto de descarga de aguas superficiales y subsuperficiales ocasionadas por las precipitaciones pluviales. Las isobatas (Figuras 24 y 25) permitieron delimitar zonas con diversos grados de problemas de drenaje, determinándose que un 35% de la Planicie Aluvial Tabasqueña cuenta con mantos freáticos elevados (-0.5 a 1.5 m) en el período de máximas lluvias. La Planicie Aluvial presenta topografía y dirección de flujo de agua subterránea en sentido sur-norte, variando el rango de niveles freáticos de pocos centímetros en la parte baja.

#### 4.1.3. Variables edáficas

La estimación de la variabilidad de las propiedades edáficas relacionadas a unidades espaciales georeferenciadas, hacen que las propiedades del suelo se distingan por causas tales como: procesos de formación (Boul *et al.*, 1980; Trangmar *et al.*, 1985; Rao *et al.*, 1979) y el manejo que reciben (Webster y Olivier, 1992). En función de la base de datos integrada por 91 perfiles de suelo se determinaron los valores promedio, desviaciones estándares y coeficientes de variación para cada una de las variables edáficas que se presentan en el Cuadro 4. La variabilidad espacial temporal presenta estadísticos de

dispersión con valores altos, indicando heterogeneidad entre los suelos de la Planicie Aluvial de Tabasco. Sin embargo, las variables implicadas en el manejo de agua: espesor del estrato, arena, limo, arcilla, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente presentaron menos variación que aquellas variables que involucran aspectos de fertilidad del suelo como es materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo asimilable.

El método estadístico multivariado por componentes principales permitió estimar la estructuración de la variabilidad de las variables edáficas y de esta manera agrupar variables que garantizan la validez de la aplicabilidad del manejo del agua.

**Cuadro 4.** Análisis estadístico de las variables edáficas de los 91 perfiles de suelos de la Planicie Aluvial de Tabasco.

Nombre de la variable	Código	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente variación (%)
Espesor del estrato	H <sub>z</sub>	43.34 cm	25.56	58.97
Arena	A	38.72 %	22.03	56.89
Limo	L	25.77 %	15.48	60.06
Arcilla	R	34.85 %	16.79	48.17
PH	pH	6.47	1.03	15.91
Materia Orgánica	MO	1.47 %	1.50	102.04
C. Intercambio Catiónico	CIC	21.50 Meq 100 g <sup>-1</sup>	15.79	73.44
Calcio	Ca	12.54 Meq 100 g <sup>-1</sup>	13.18	105.10
Magnesio	Mg	5.190 Meq 100 g <sup>-1</sup>	5.59	107.70
Sodio	Na	0.302 Meq 100 g <sup>-1</sup>	0.44	145.69
Potasio	K	0.334 Meq 100 g <sup>-1</sup>	0.50	149.70
Fósforo asimilable	P	8.71 ppm	13.78	158.20
Capacidad de campo	CC	29.00	11.80	40.68
P. marchitez Permanente	PMP	15.46	7.28	47.08
Densidad Aparente	Da	1.25 g cm <sup>-3</sup>	0.45	36.00

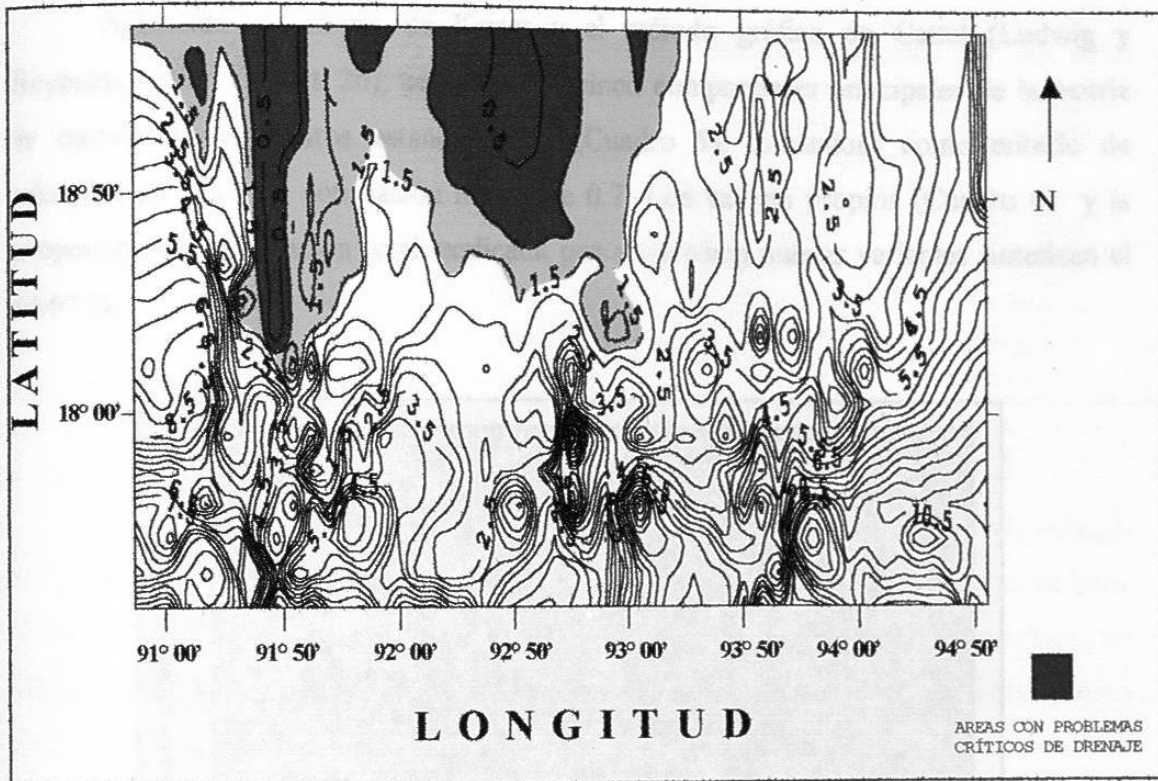


Figura 24. Mapa de isobatas del mes de septiembre. Planicie Aluvial Tabasqueña.

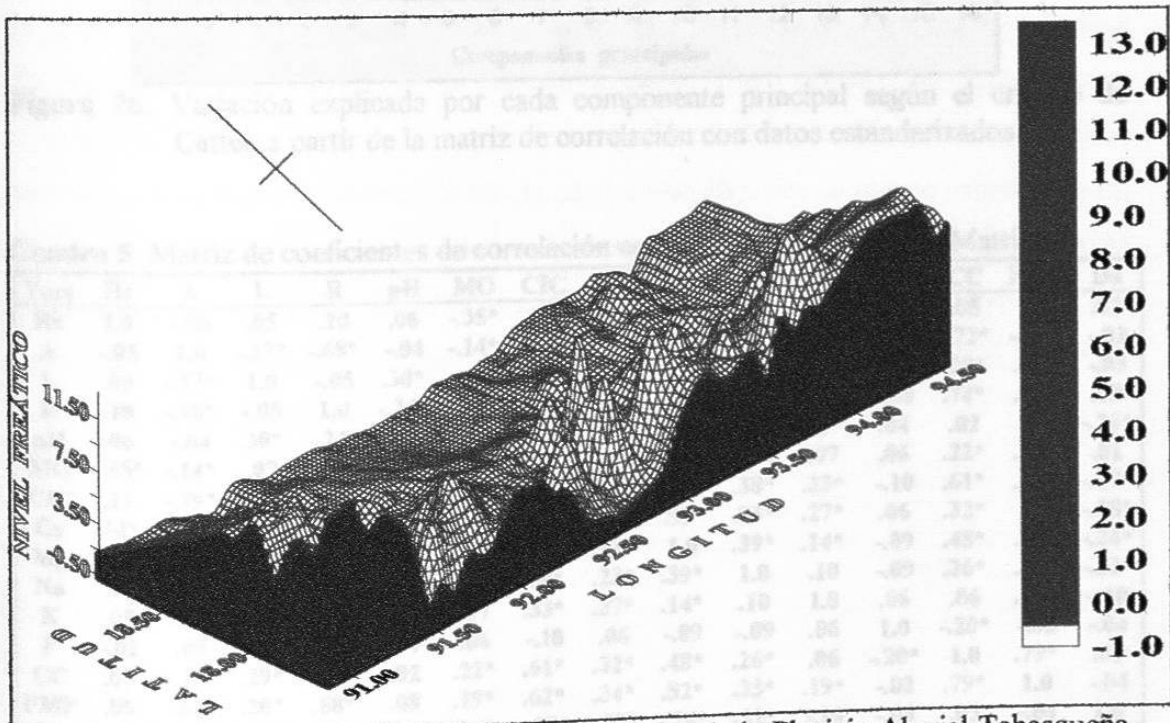


Figura 25. Distribución espacial del mapa de isobatas de la Planicie Aluvial Tabasqueña (vista tridimensional).



Aplicando el criterio de Kaiser y el método gráfico de Cattell (Ludwig y Reynolds, 1988) (Figura 26); se definieron cinco componentes principales de la matriz de correlación con datos estandarizados (Cuadro 5); tomándose como criterio de selección un valor de correlación mayor de 0.7. Los valores propios (Cuadro 6) y la proporción de la variación total explicada por estas cinco nuevas variables sintetizan el 84.67 %.

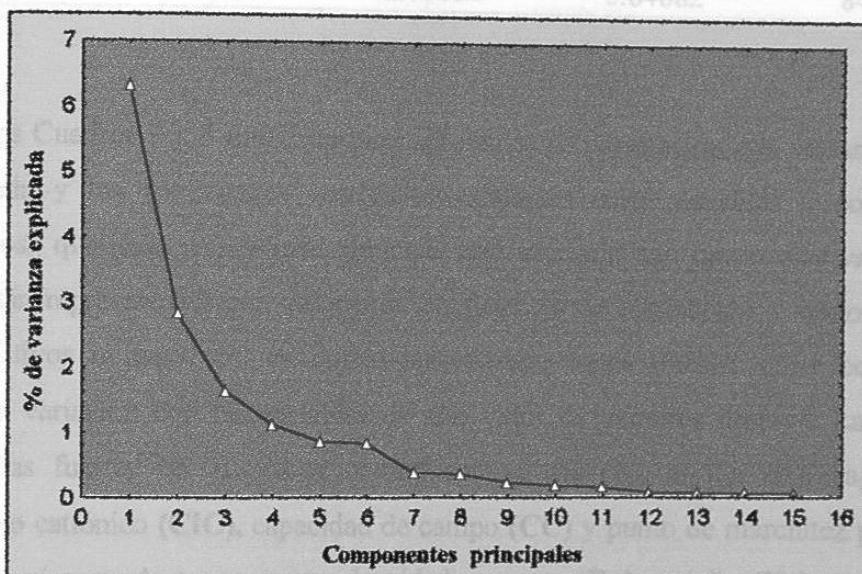


Figura 26. Variación explicada por cada componente principal según el criterio de Cattell, a partir de la matriz de correlación con datos estandarizados.

Cuadro 5. Matriz de coeficientes de correlación con datos estandarizados (Matriz R).

Vars	Hz	A	L	R	pH	MO	CIC	Ca	Mg	Na	K	P	CC	PMP	Da
Hz	1.0	-.05	.05	.10	.06	-.35*	.11	.14*	.10	.12	.05	-.01	.05	.06	.02
A	-.05	1.0	-.57*	-.68*	-.04	-.14*	-.39*	-.30*	-.32*	-.10	-.01	.08	-.72*	-.61*	-.02
L	.05	-.57*	1.0	-.05	.30*	.07	.15*	.39*	.20*	.06	.07	-.07	.29*	.20*	-.03
R	.10	-.68*	-.05	1.0	-.24*	.14*	.39*	.06	.25*	.08	-.05	-.08	.74*	.68*	.08
pH	.06	-.04	.30*	-.24*	1.0	-.07	.22*	.52*	.26*	.23*	.19*	.04	.02	.08	-.26*
MO	-.35*	-.14*	.07	.14*	-.07	1.0	.10	.05	.07	-.04	.07	.06	.22*	.19*	.01
CIC	.11	-.39*	.15*	.39*	.22*	.10	1.0	.68*	.61*	.38*	.33*	-.10	.61*	.62*	-.27*
Ca	.14*	-.30*	.39*	.06	.52*	.05	.68*	1.0	.53*	.23*	.27*	.06	.32*	.34	-.28*
Mg	.10	-.32*	.20*	.25*	.26*	.07	.61*	.53*	1.0	.39*	.14*	-.09	.48*	.52*	-.24*
Na	.12	-.10	.06	.08	.23*	-.04	.38*	.23*	.39*	1.0	.10	-.09	.26*	.33*	-.32*
K	.05	-.01	.07	-.05	.19*	.07	.33*	.27*	.14*	.10	1.0	.06	.06	.19*	-.10
P	-.01	.08	-.07	-.08	.04	.06	-.10	.06	-.09	-.09	.06	1.0	-.20*	-.02	-.04
CC	.05	-.72*	.29*	.74*	.02	.22*	.61*	.32*	.48*	.26*	.06	-.20*	1.0	.79*	.03
PMP	.06	-.61*	.20*	.68*	.08	.19*	.62*	.34*	.52*	.33*	.19*	-.02	.79*	1.0	-.04
Da	.02	-.02	-.03	.08	-.26*	.01	-.27*	-.28*	-.24*	-.32*	-.10	-.04	.03	-.04	1.0

**Cuadro 6.** Valores propios y proporción de la variación explicada por los cinco componentes principales a partir de la matriz de correlación.

Componentes principales	Valor propio	Valor propio acumulado	Proporción de la varianza total explicada.	
			Absoluta %	Acumulada %
1º	6.300201	6.300201	42.00134	42.00134
2º	2.820429	9.12063	18.80286	60.80420
3º	1.626495	10.74712	10.84330	71.64750
4º	1.106393	11.85352	7.37595	79.02345
5º	0.847324	12.70084	5.64882	84.67227

Los Cuadros 7 y 8 muestran los coeficientes de correlación con varianza máxima normalizada y los coeficientes vectoriales existentes entre variables y componentes, apreciándose que cada componente principal está asociado con una o más variables, las cuáles están representadas con valores de coeficientes de correlación y vectores propios altos, positivos o negativos, en donde las combinaciones lineales entre componentes reflejan la variación con las variables de alto valor de vectores propios. Las variables identificadas fueron: en el primer componente; arena (**A**), arcilla (**R**), capacidad de intercambio catiónico (**CIC**), capacidad de campo (**CC**) y punto de marchitez permanente (**PMP**); en el segundo componente, densidad aparente (**Da**) y sodio (**Na**); para el tercer componente, espesor del estrato (**H<sub>z</sub>**) y materia orgánica (**MO**); para el cuarto componente, limo (**L**) y el quinto componente se asocia con potasio (**K**). Por lo que se infiere que las variables con valores de vectores propios altos o correlaciones altas en los tres primeros componentes (**A**, **R**, **CIC**, **CC**, **PMP**, **Da**, **Na**, **H<sub>z</sub>**, **MO**) están vinculados estrechamente con la capacidad de retención de humedad del suelo independiente de la presión potencial total en que se encuentre el agua.

**Cuadro 7.** Coeficientes de correlación de los cinco componentes principales y las variables edáficas con el método de varianza máxima normalizada ( $r > 0.7$ ).

Variable	Componente principal 1	Componente principal 2	Componente principal 3	Componente principal 4	Componente principal 5
Hz	0.101301	0.010692	0.925697*	0.010114	-0.020872
A	-0.885629*	-0.003513	0.053073	-0.379475	0.072098
L	0.338044	0.038628	-0.027463	0.884043*	-0.067626
R	0.948220*	-0.043774	-0.028857	-0.133059	-0.093915
pH	-0.250457	0.568727	0.087239	0.669089	0.133630
MO	0.264546	-0.091734	-0.878947*	-0.015964	0.018783
CIC	0.710127*	0.585790	0.011793	0.191026	0.161267
Ca	0.334074	0.581329	0.066425	0.601030	0.250723
Mg	0.600092	0.640289	0.015289	0.259301	-0.014026
Na	0.260723	0.843950*	0.118836	-0.014897	-0.171477
K	0.054644	0.293597	0.017235	0.096553	0.774914*
P	-0.374136	-0.257148	-0.095027	-0.090809	0.543408
CC	0.937115*	0.165881	-0.082364	0.147917	-0.122848
PMP	0.922148*	0.253574	-0.077632	0.086688	0.004174
Da	0.019015	-0.847028*	0.017738	-0.159166	-0.256486
Var. expl.	4.856548	3.100312	1.682837	1.928758	1.132385
Prop. tot.	0.323770	0.206687	0.112189	0.128584	0.075492

**Cuadro 8.** Coeficientes vectoriales de los cinco componentes principales con el método de varianza máxima normalizada y utilizando la matriz de correlación.

Variables	V e c t o r e s p r o p i o s				
	1°	2°	3°	4°	5°
Hz	0.095325	-0.100897	0.585873	-0.014187	0.079281
A	-0.197545	0.184214	-0.024102	-0.203297	-0.025585
L	-0.008401	-0.222481	-0.011902	0.623861	-0.108799
R	0.269689	-0.090107	0.053191	-0.171931	0.072561
pH	-0.180656	0.130605	-0.018710	0.371379	-0.068172
MO	0.022458	0.008856	-0.519729	-0.006457	-0.002156
CIC	0.134148	0.135699	0.015637	-0.084805	0.147778
Ca	0.006849	0.058195	0.024525	0.249832	0.147914
Mg	0.061701	0.195720	-0.013810	-0.020079	-0.067610
Na	-0.050650	0.432676	-0.007868	-0.227767	-0.289005
K	0.093484	-0.031489	0.057177	-0.077559	0.743919
P	0.015072	-0.161566	-0.009854	-0.018218	0.551704
CC	0.203567	-0.036508	-0.008967	-0.008989	-0.031708
PMP	0.214727	0.000651	-0.003404	-0.086534	0.086014
Da	0.089597	-0.357371	0.077332	0.109735	-0.078585

En el primer componente las variables arcilla, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de campo y punto de marchitez permanente forman un contraste

con la variable arena, ya que las primeras presentan valores de correlación altos y positivos mientras que la segunda tiene valor de correlación alto pero negativo, lo que significa que el valor del primer componente aumentará si aumenta el contenido de arcilla y por lo tanto tenderá a incrementar la capacidad de retención de agua del suelo. Para el componente principal dos contribuyen más las variables sodio y densidad aparente. Interpretando la estructura general del CP2 se aprecia que para las condiciones de la Planicie Aluvial el contenido de sodio en los suelos contrasta con la cantidad de masa del suelo seco por unidad de volumen, debido a que el sodio presenta un efecto adverso en el proceso de retención de humedad cuando el suelo presenta mayor contenido de arcilla expandible (Van Der Molen, 1978). El componente principal tres está conformado principalmente por espesor del horizonte y materia orgánica; ambos están correlacionados en forma contrastante ya que a medida que el espesor del horizonte aumenta, el contenido de materia orgánica disminuye. Desde el punto de vista de física del suelo, la materia orgánica influye en la formación y estabilidad de los agregados. La agregación lleva consigo un incremento en la porosidad lo cual significa una mayor aireación, mejor infiltración, percolación, prevención de escorrentía y erosión. Además, la alta capacidad de adsorción de agua por el humus da lugar a un aumento de la capacidad de retención de humedad del suelo (Van Beers, 1978). Para el cuarto y quinto componente principal solo existe efecto de las variables limo y potasio, respectivamente.

Las distribuciones espaciales del componente principal 1 con respecto a los otros componentes están representadas en un par de ejes ortogonales (Figuras 27 a 30). El rectángulo unitario ( $-1 \leq r \leq 1$ ) trazado con centro en el origen (0,0) del par de coordenadas, permitió identificar en forma visual las variables que conforman cada uno de los componentes principales.

Con puntos en el espacio se presentan los valores de la matriz original de las variables, arena, arcilla, capacidad de intercambio catiónico, capacidad de campo y punto de marchitez permanente presentando tendencia lineal positiva, mientras que la arena tuvo tendencia lineal negativa (Figura 31).

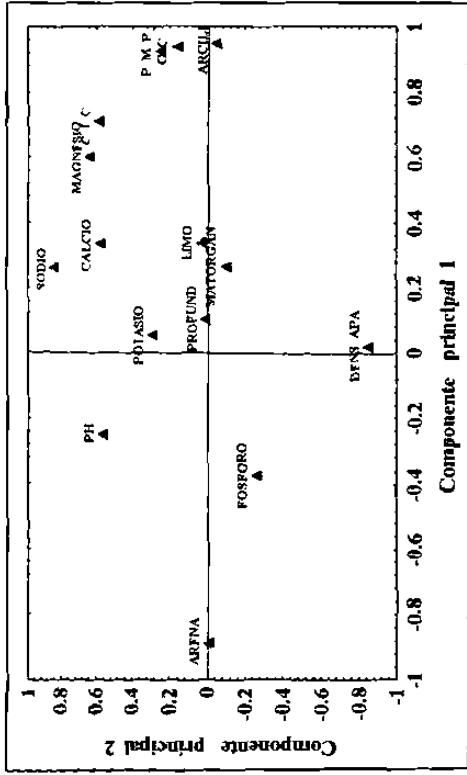


Figura 27. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y segundo componente principal.

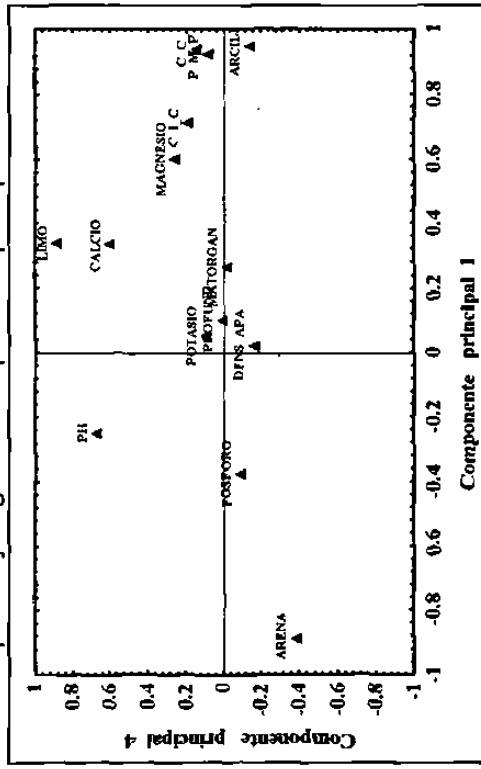


Figura 29. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y cuarto componente principal.

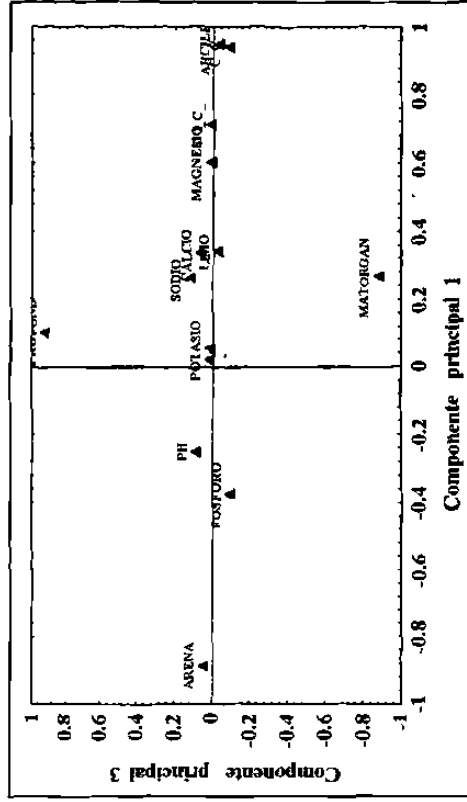


Figura 28. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y tercer componente principal.

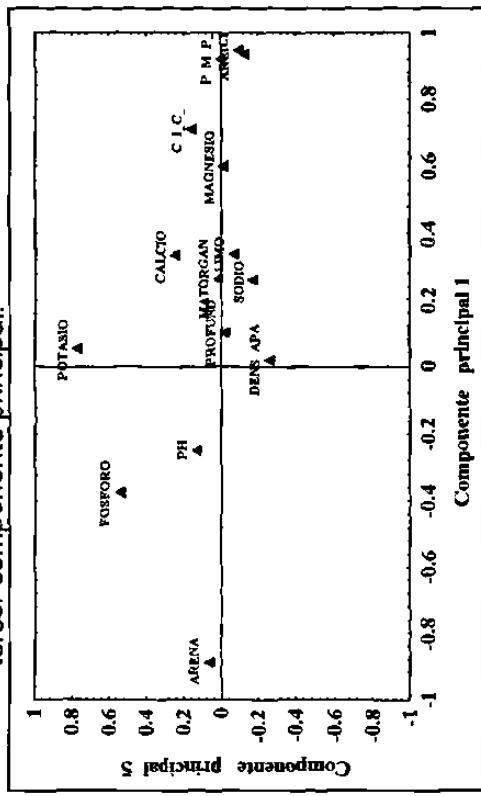
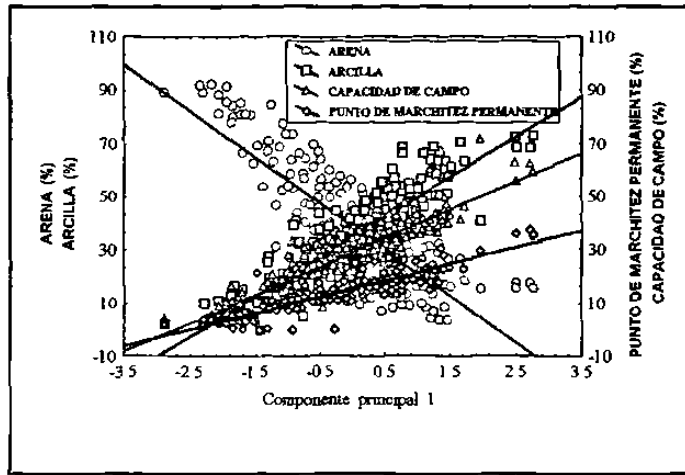
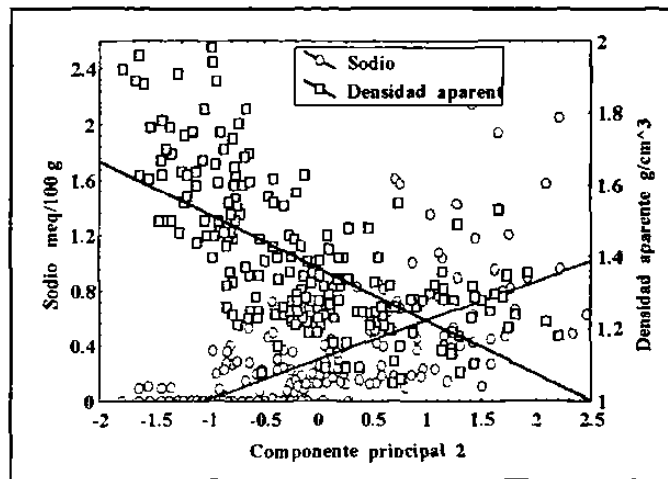


Figura 30. Distribución espacial de las variables edáficas en función del coeficiente de correlación entre el primer y quinto componente principal.

La Figura 32 muestra el diagrama de puntos de las variables sodio y densidad aparente en función del componente principal 2, donde el sodio presentó tendencia lineal positiva, mientras que la densidad aparente se comportó con tendencia lineal negativa.



**Figura 31.** Diagrama de puntos que muestra la distribución y tendencia de los suelos en base a valores propios entre el primer componente principal y las variables identificadas significativamente ( $r > 0.7$ ) dentro del mismo.



**Figura 32.** Diagrama de puntos que muestra la distribución y tendencia de los suelos en base a valores propios entre el segundo componente principal y las variables identificadas significativamente ( $r > 0.7$ ) dentro del mismo.

Tomando las variables: espesor del estrato, arena, limo, arcilla, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo asimilable, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, el análisis multivariado por conglomerados permitió definir el agrupamiento de los suelos en tres grupos, con un índice de similitud de 0.01, y de acuerdo a la nomenclatura de

taxonomía de suelos FAO-UNESCO (1989), el primer grupo asoció los suelos con mayor grado de similitud de acuerdo a sus características físicas, químicas y fisico-químicas dentro de los Vertisoles. El segundo grupo se ubicó dentro de los Fluvisoles y el tercer grupo en los Gleysoles (Figura 33).

Tomando como base la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo de acuerdo a sus características físicas como capacidad de campo, punto de marchitez permanente, espesor de horizontes y densidad aparente; el análisis de correlación y conglomerados dio como resultado que las variables humedad aprovechable y espesor de horizontes presentaron significancia estadística ( $r = 0.69$ ) (Figura 34).

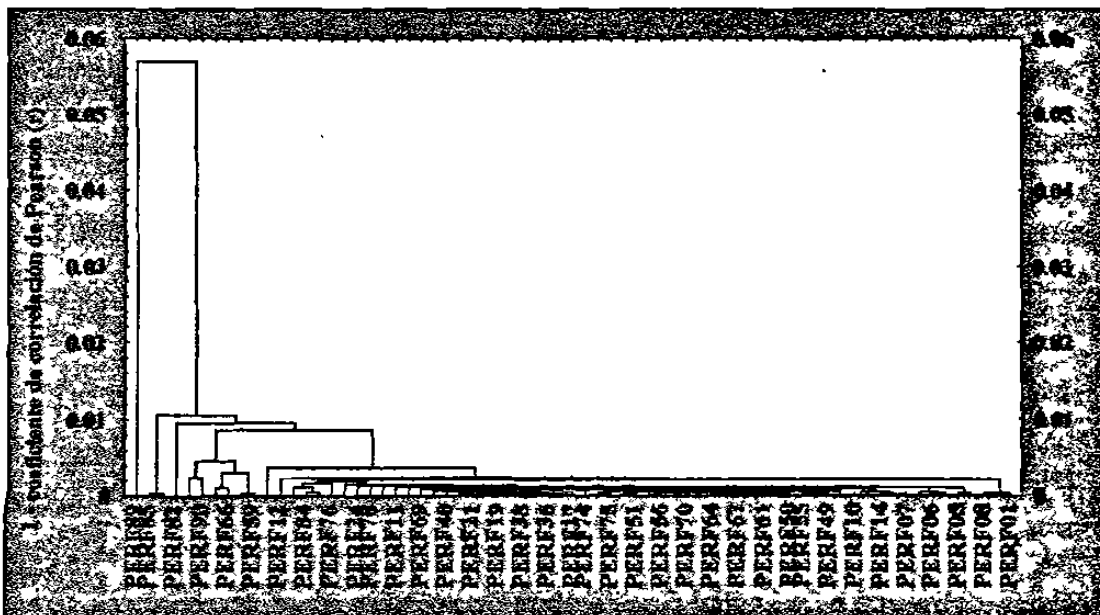


Figura 33. Dendrograma de la clasificación de perfiles de suelos de la Planicie Tabasqueña

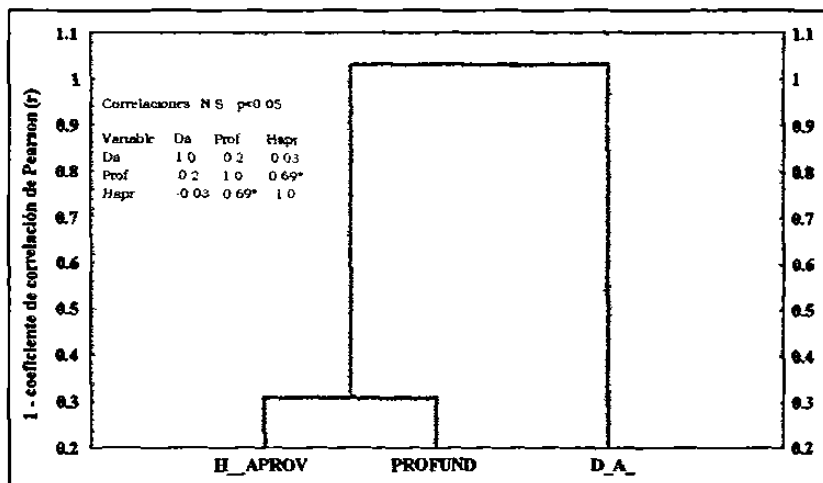


Figura 34. Dendrograma de variables geohídricas de los perfiles de suelos de la Planicie Tabasqueña.

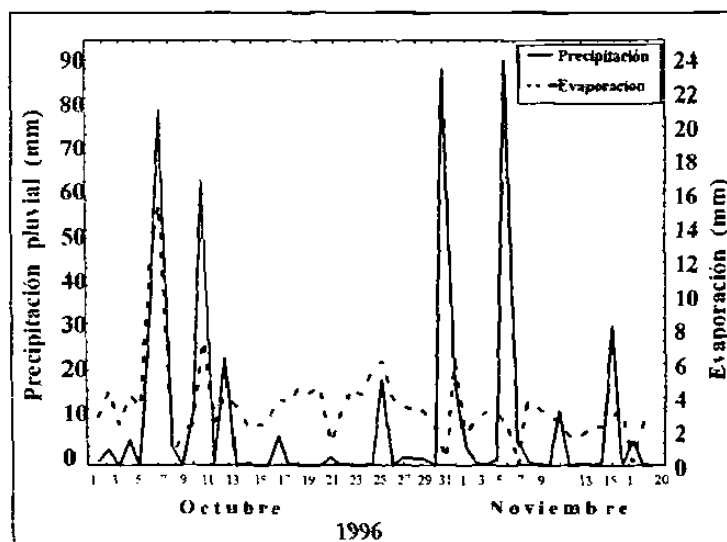
## 4.2. Segunda etapa

### 4.2.1. Variables climatológicas

Las estadísticas descriptivas de las variables climatológicas (estacion meteorologica del campo experimental CEICADES) presentan la distribucion de la precipitacion pluvial, evaporacion, humedad relativa, temperaturas máximas y mínimas en función del tiempo, para conocer el comportamiento de dichas variables durante la evaluacion del modulo de drenaje (1° de Octubre – 30 de Noviembre de 1996) (Cuadro 9). El valor promedio del mes mas lluvioso encontrado (11.8 mm) no difiere significativamente al valor promedio de lluvias diarias del mes mas lluvioso (12.09 mm) segun el metodo de isoyetas estimado anteriormente, por lo que, los datos de dicha estacion meteorologica presentaron consistencia en longitud y homogeneidad de las series climaticas representativas para la Planicie Aluvial de Tabasco (Figuras 35 y 36).

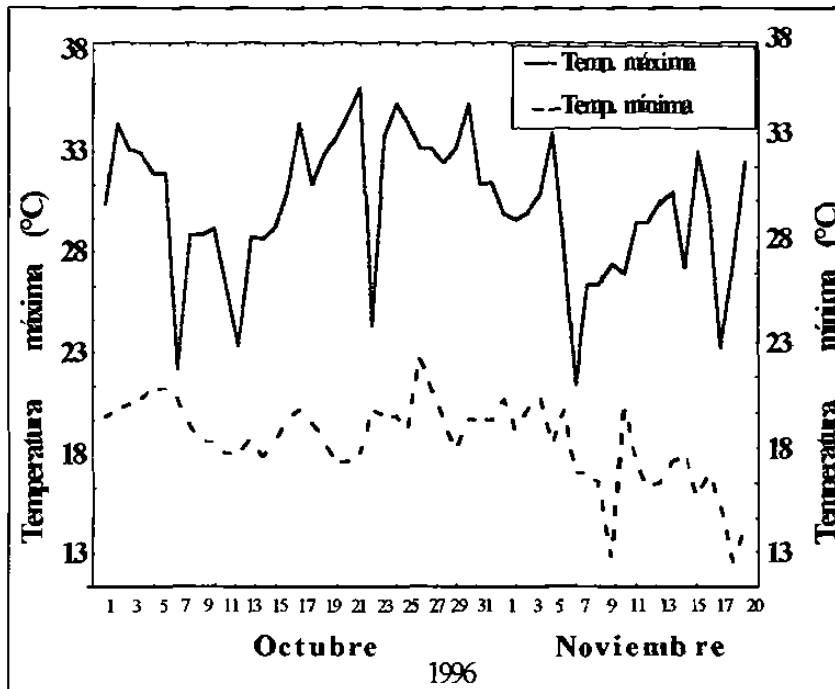
**Cuadro 9.** Estadísticas descriptivas de variables climatológicas del modulo de drenaje.

Variables	Promedio	Mínimo	Máximo	Dev. Estandar
Precipitación (mm)	11.8	0.0	86.0	20.70
Evaporación (mm)	3.48	1.0	15.35	2.44
Humedad relativa (%)	89.55	72.0	98.0	4.66
Temperatura máxima (°C)	31.92	23.0	37.8	3.49
Temperatura mínima (°C)	20.05	14.2	24.0	1.94



**Figura 35.** Relacion entre la precipitacion pluvial y evaporacion durante el periodo de evaluacion del modulo de drenaje (1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996).





**Figura 36.** Relación entre temperaturas máximas y mínimas durante el periodo de evaluación del módulo de drenaje (1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996).

#### 4.2.2. Variables agrohidrológicas y edáficas

Bajo las condiciones topográficas, uso, manejo del suelo y un evento de lluvia de 75.5 mm en el módulo de drenaje en sus diferentes espaciamientos entre drenes (C-6, C-7, D-5 y D-6) se observó que la configuración espacial temporal de curvas de nivel del manto freático con respecto al nivel medio del mar (isohypsas) y al nivel del suelo (isobatas) las líneas van en dirección oeste-este en un rango de 7.6 hasta 8.9 m y el flujo del agua subterránea que es perpendicular a las líneas equipotenciales, fluye en sentido sur-norte (Figura 37).

El plano de isobatas identificó áreas con diferentes niveles freáticos con respecto al nivel del suelo, observándose que las mayores elevaciones se encuentran en las zonas suroeste y sureste en un rango de 25 hasta 40 cm donde no existe drenaje subterráneo; mientras que en la parte norte-centro-sur fluctúa de 0 hasta 10 cm, esta manifestación es debida a la respuesta con los drenes subterráneos en estas áreas (Figura 38).

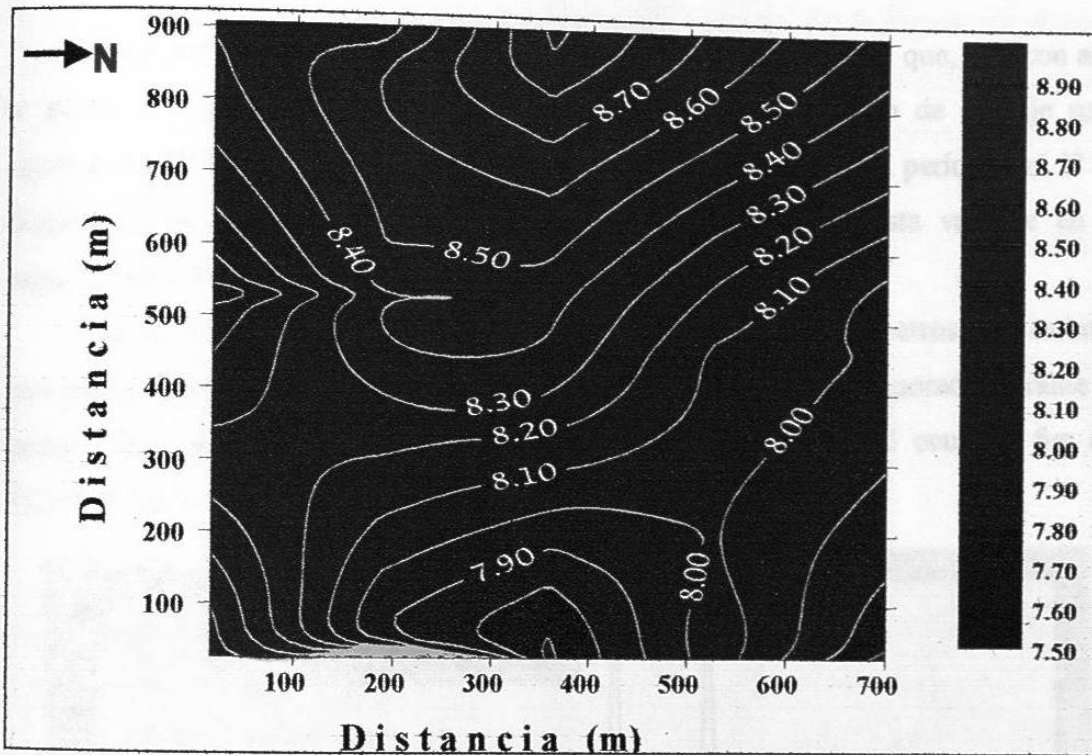


Figura 37. Plano de isohypsas del módulo de drenaje.

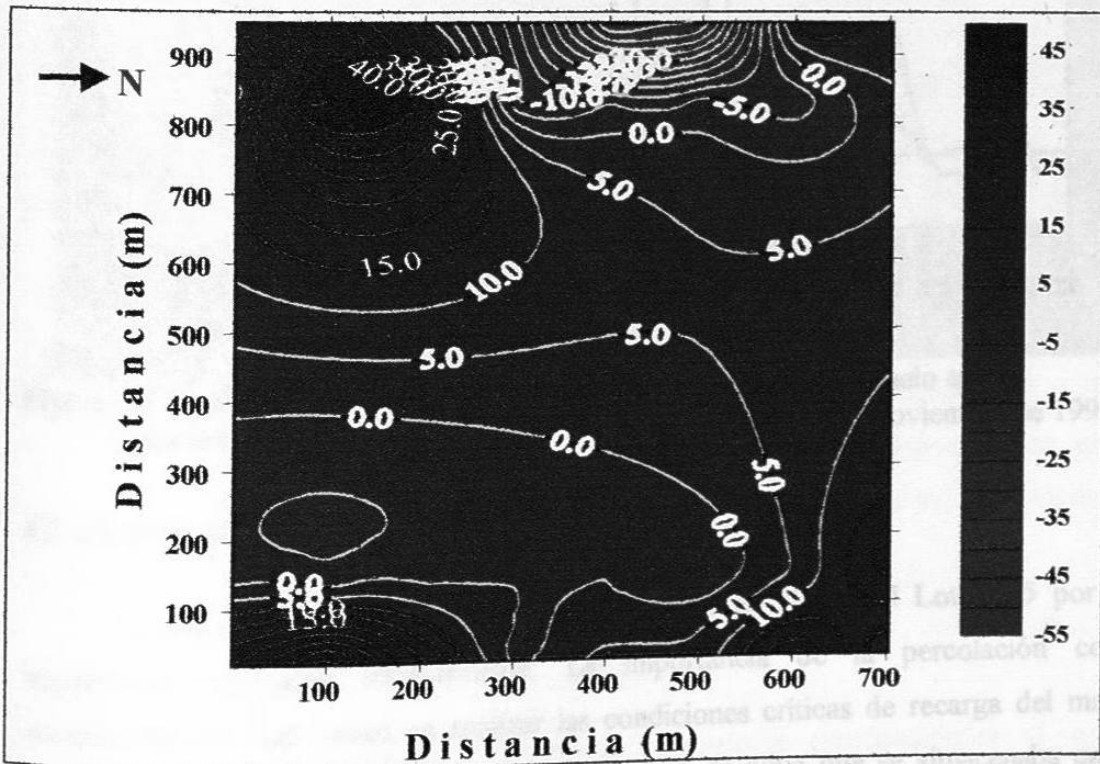


Figura 38. Plano de isobatas del módulo de drenaje.

#### 4.2.2.1. Evaporación del suelo

La evaporación es uno de los componentes del balance de agua que, año con año se evalúa en los diferentes espaciamientos entre drenes del módulo de drenaje para observar su comportamiento; durante la evaluación correspondiente al período del 1° de Octubre al 30 de Noviembre de 1996 se tomaron lecturas de esta variable en el espaciamiento de 20 m del Lote D-5.

La forma para evaluar la evaporación fue por medio de lisímetros que estiman con mayor precisión la pérdida de agua. La cantidad de agua evaporada durante el período de evaluación con respecto a la precipitación pluvial total ocurrida fue del 15.3% (Figura 39).

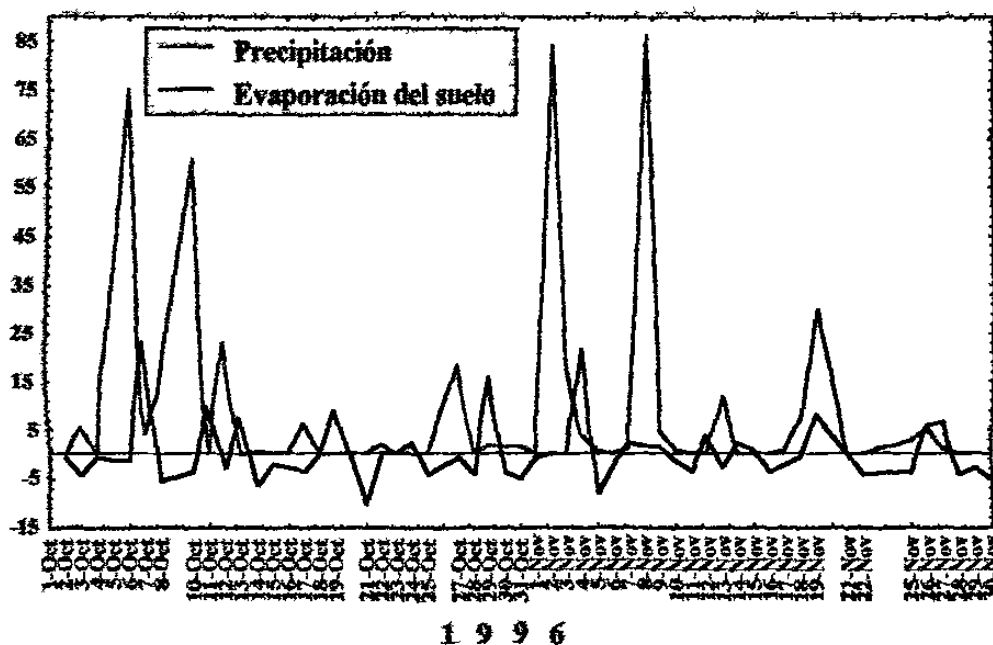


Figura 39. Relación entre la precipitación pluvial y evaporación del suelo en el espaciamiento de 20 m del lote D-5. 1o de Octubre al 30 de Noviembre de 1996.

#### 4.2.2.2. Percolación

La percolación se evaluó en el espaciamiento de 20 m del Lote D-5 por las condiciones explicadas anteriormente. La importancia de la percolación como componente del flujo radica en analizar las condiciones críticas de recarga del manto freático. La percolación se midió como el volumen de agua que se almacenaba en un

depósito ubicado en el fondo de los lisímetros, obteniéndose que el 41.43% del agua total se percola y es desalojada por los drenes subterráneos. En la Figura 40 se puede observar la relación funcional entre el tiempo y la percolación; esta suele variar a lo largo de la época de lluvias ya que depende básicamente de las condiciones de humedad presentes en el suelo.

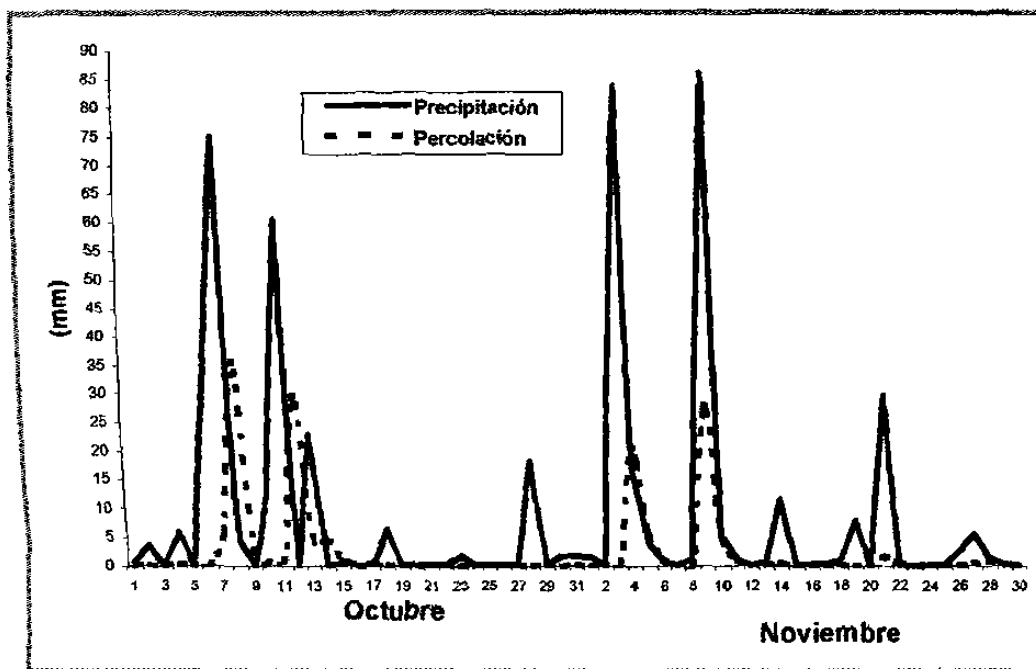


Figura 40. Relación entre la precipitación pluvial y percolación del suelo en el espaciamiento 20 m del lote D-5, 1o de Octubre al 30 de Noviembre de 1996.

#### 4.2.2.3. Escorrentía superficial

Cuando la lluvia excedió la capacidad de infiltración se produjeron encharcamientos y escurrimientos en la superficie del suelo. Esta escorrentía fue evaluada durante cuatro periodos de observación en dos áreas de captación: 9 y 36 m<sup>2</sup> en el espaciamiento de 20 m del Lote D-5; encontrándose en el balance hídrico, que el 29.73% se pierde por escurrimiento superficial, una vez satisfecha las necesidades de evaporación.

#### 4.2.2.4. Profundidad del estrato impermeable

Para la estimación de la distancia equivalente (profundidades al estrato impermeable) aplicable al modelo de Hooghoudt se muestrearon 31 sitios dentro del

módulo de drenaje (Figura 41). La representación espacial de la profundidad del estrato impermeable mostró que los Lotes C-6 y C-7 ubicados en la porción noroeste y noreste presentaron un rango entre 380 hasta 460 cm; mientras que los lotes D-6 y D-5 localizados en las zonas sureste y suroeste, respectivamente presentaron un rango de 390 hasta 480 cm de profundidad del estrato impermeable con respecto a la superficie del suelo.

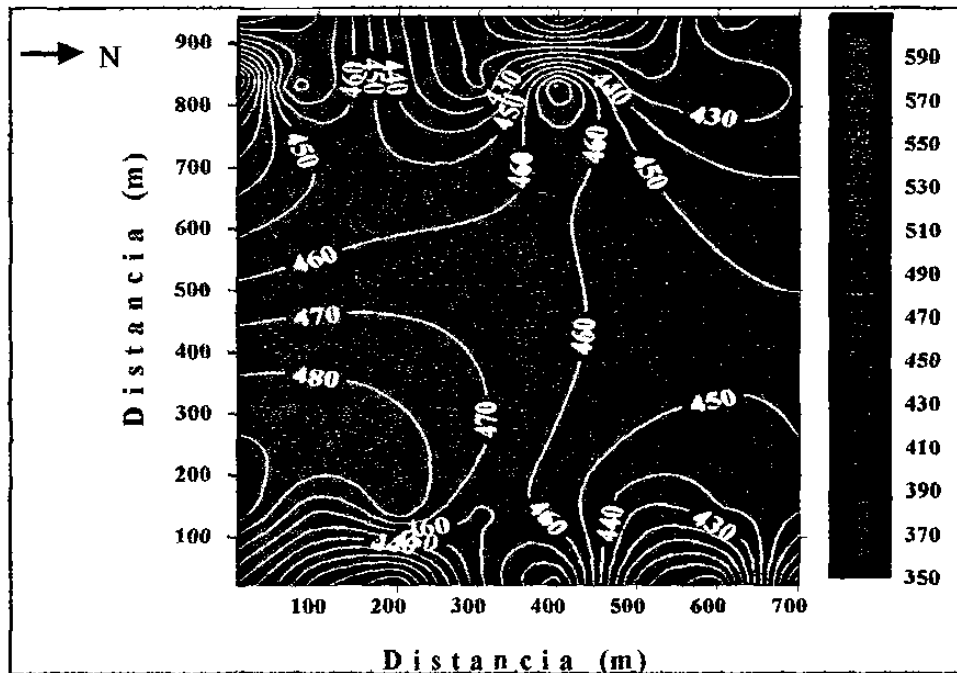


Figura 41. Configuración espacial de la capa impermeable con respecto al nivel del suelo del módulo de drenaje.

#### 4.2.2.5. Cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no-saturada

Debido a que el período de estudio fue en época de lluvias, el patrón de comportamiento del contenido de agua en el perfil del suelo presentó poca variación en espacio y tiempo en cada uno de los estratos y espaciamientos muestreados; sin embargo, se aprecia la existencia de variabilidad en el contenido de humedad por efecto de espaciamientos entre drenes. En general, los espaciamientos de 10, 20 y 30 m presentaron menores contenidos de humedad que los de 40 y 50 m, indistintamente de los estratos analizados (0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm; Figuras 42, 43, 44 y 45). Esto obedece a que existen mejores respuestas de desagüe del exceso de agua en espaciamientos más pequeños.

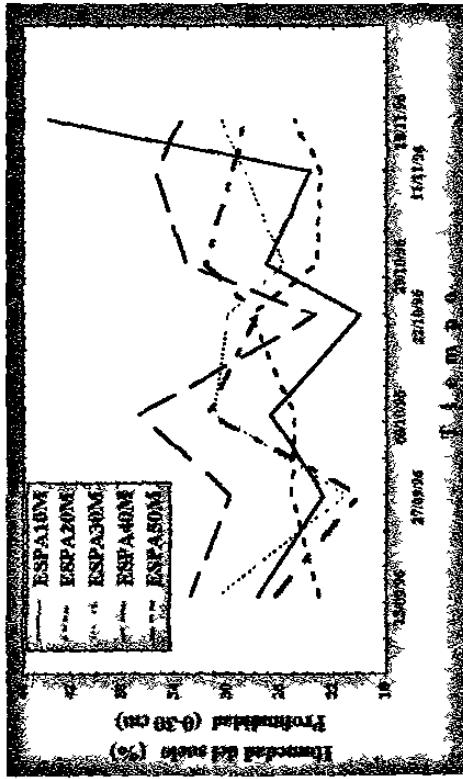


Figura 42. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 0-30 cm.

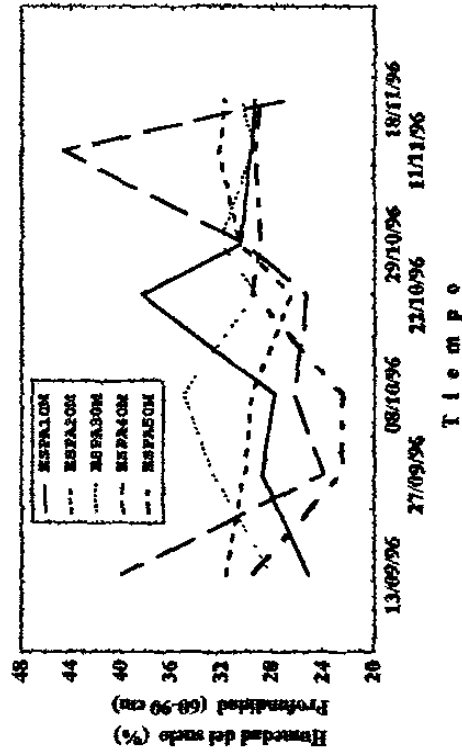


Figura 44. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 60-90 cm.

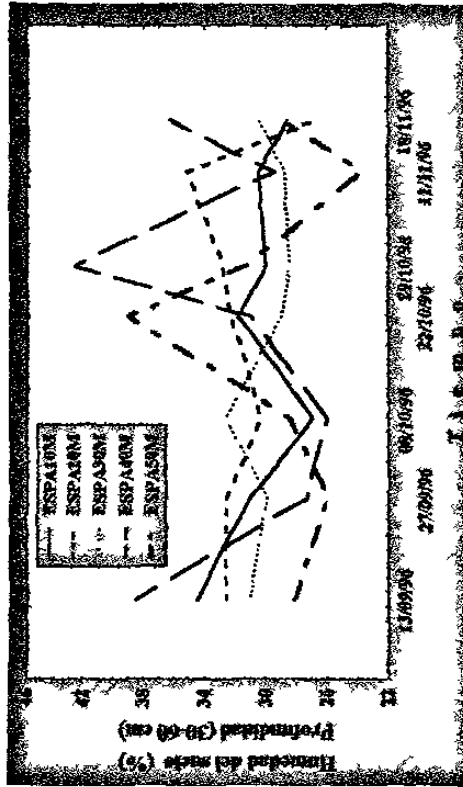


Figura 43. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 30-60 cm.

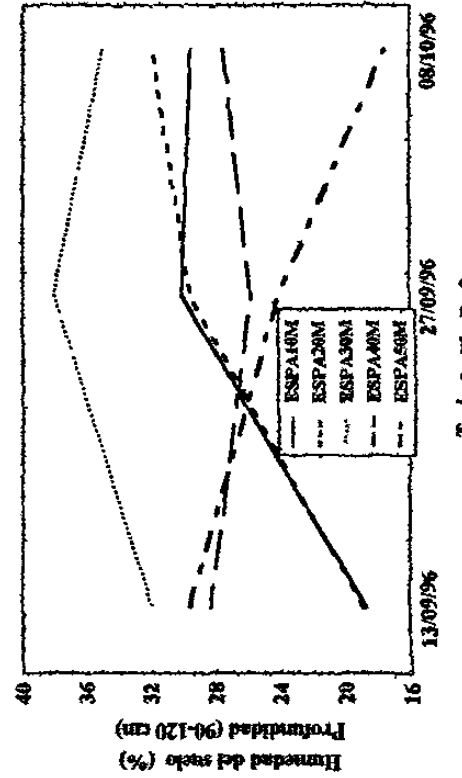


Figura 45. Comportamiento del contenido de humedad del suelo a una profundidad de 90-120 cm.

#### **4.2.2.6. Relación entre la altura del manto freático (carga hidráulica) y la descarga de los drenes**

##### **4.2.2.6.1. Lote D-5**

En el lote D-5, el patrón de comportamiento entre la precipitación pluvial (mm), carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$  en cm) y descarga de drenes expresada como coeficiente de drenaje ( $q$  en  $\text{mm día}^{-1}$ ) para los espaciamientos entre drenes de 10, 20, 30, 40 y 50 m está caracterizado en tres períodos: El primer período en donde no existe recarga al manto freático por causas de baja intensidad y cantidad de lluvia, por lo que el manto freático se mantiene cerca del nivel de los drenes y sin presencia de descargas ( $h = 0$ ,  $q = 0$ ).

El segundo período describe las elevaciones de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes después de existir un evento de lluvia, lo cual trae consigo el inicio e incremento de la descarga de drenes; considerando la relación espacio poroso y precipitación se estimó que este período ocurre cuando se tiene un evento de lluvia superior a 17.5 mm. Cuando este proceso está sucediendo no existe una relación estricta entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y la descarga de drenes, siendo los valores de descarga en este momento más altos que lo que sería bajo condiciones de flujo estabilizado o transitorio con la misma carga hidráulica.

El incremento de las elevaciones de carga hidráulica en el punto medio entre drenes (pendientes positivas) básicamente depende de la cantidad de agua percolada al acuífero, tipo de suelo y manejo del agua expresado como espaciamiento entre drenes. Las cargas hidráulicas en función de los espaciamientos entre drenes subterráneos y bajo las condiciones en que se manejó el suelo del lote D-5, se encontró que en eventos de lluvia de 75.5, 84.0 y 86.0 mm, las respuestas de reacción difieren poco entre espaciamientos (similar magnitud y dirección). Sin embargo, las cargas hidráulicas máximas que alcanzaron con las recargas de estos eventos de lluvia fueron diferentes variando de 120 a 130 cm (Figura 46) y manteniéndose por uno o dos días hasta que la recarga fue menor que la descarga de drenes (puntos picos). Patrones similares ocurren para las descargas de drenes, inmediatamente después de un aumento instantáneo de la carga hidráulica, la descarga de drenes cambió hasta alcanzar valores promedios de  $14.4 \text{ mm día}^{-1}$  (Figura 47).

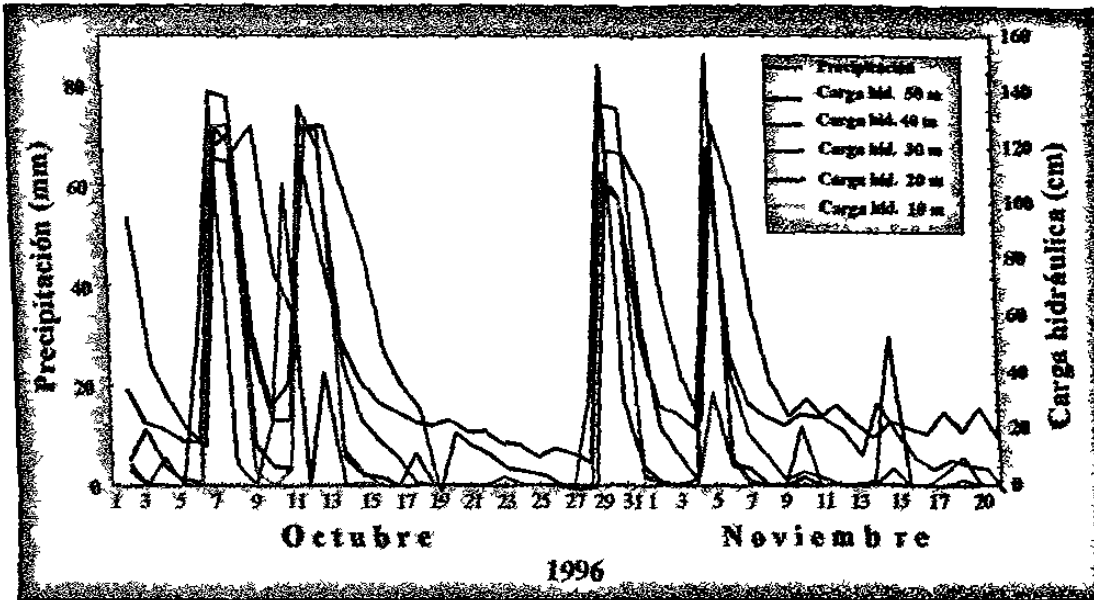


Figura 46. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m (Lote D-5). 1o de Octubre al 20 de Noviembre. de 1996.

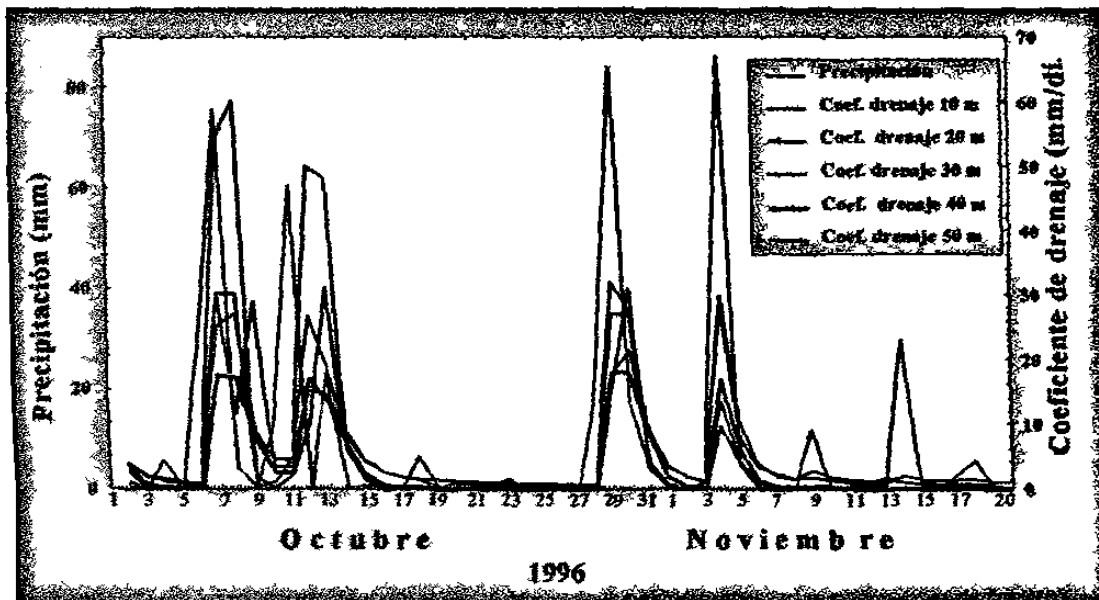


Figura 47. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m (Lote D-5). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

El tercer período denominado proceso de recesión puede considerarse como comportamiento estabilizado, es decir, la relación funcional del abatimiento de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y las descargas de drenes disminuyen en forma gradual hasta llegar a la recesión completa. Tomando como referencia el número de días



que tardan drenando los drenes en forma continua (tiempo de recesión), el espaciamiento de 50 m se comportó diferente a los demás, llegando a tardar 12 días para un evento de lluvia de 75.5 mm, mientras que los espaciamientos de 10, 20, 30 y 40 m tardaron 3, 3, 7 y 6 días, respectivamente (Figura 48); esto es debido a la variabilidad espacial de la constitución granulométrica en el perfil del suelo, microgeomorfología y respuesta por efecto del espaciamiento entre drenes.

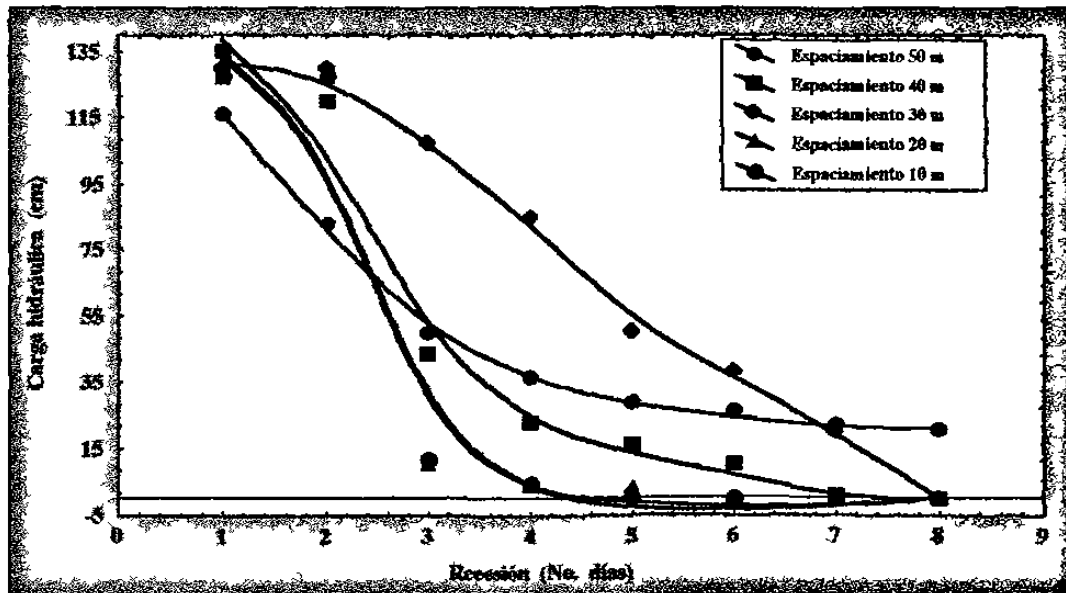


Figura 48. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote D-5 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

#### 4.2.2.6.2. Lote C-7

En el lote C-7, las relaciones que guardan la precipitación, carga hidráulica y descarga de drenes solo presentaron dos períodos; El primer período no existió ( $h=0, q=0$ ) debido a que los drenes en todos los espaciamientos 10, 20, 30, 35 y 50 m trabajaron en forma continua ( $h \geq 0, q \geq 0$ ).

El segundo período presentó la misma tendencia de respuesta instantánea a un evento de lluvia para las cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes en todos los espaciamientos llegando a alcanzar valores de 120 cm. Aun cuando no existe diferencia representativa de cargas hidráulicas entre espaciamientos el orden de máximo a mínimo valor fueron para los espaciamientos de 35, 30, 50, 10 y 20 m (Figura 49). Las descargas de drenes durante este período alcanzaron valores de  $16 \text{ mm día}^{-1}$  (Figura 50).

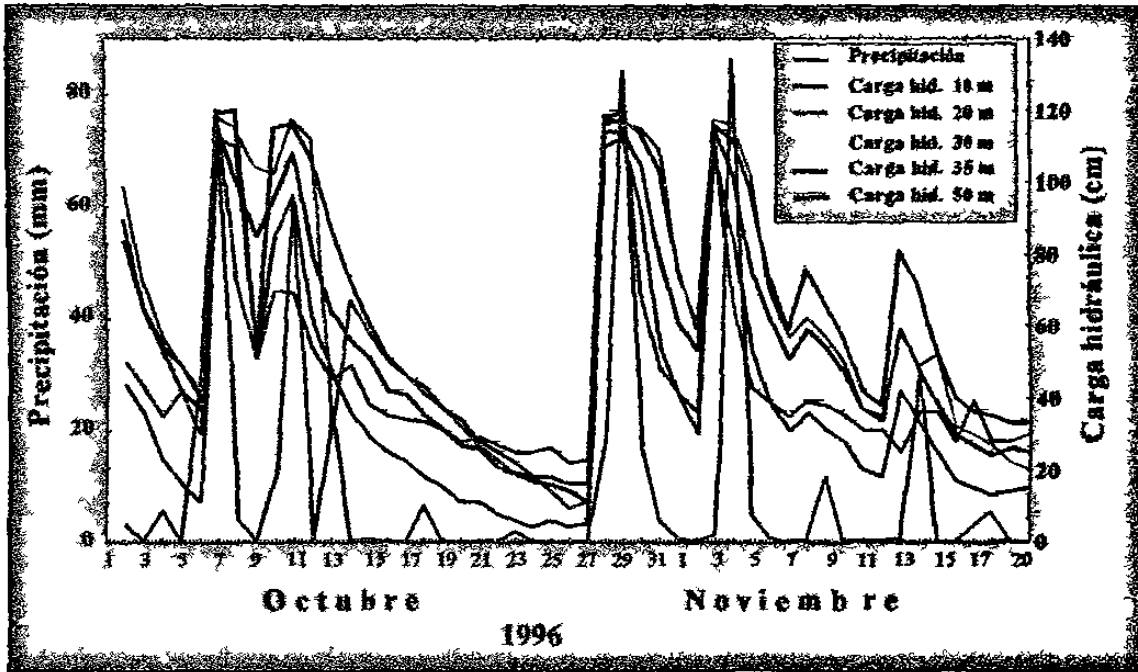


Figura 49. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m (Lote C-7). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

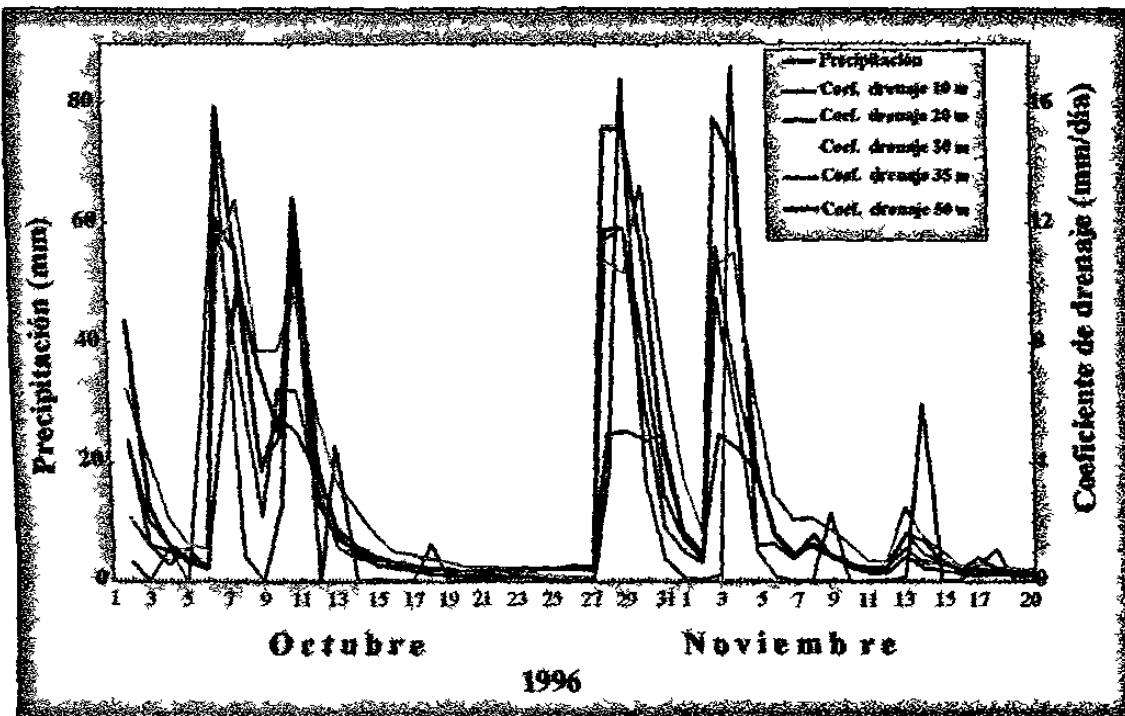


Figura 50. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m (Lote C-7). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

El tercer período o recesión total no se presentó debido a que el dren colector abierto en donde desalojan el agua los drenes subterráneos permaneció parcialmente azolvado, trabajando de esta forma bajo condiciones semiahogadas y ahogadas. Sin embargo, se puede observar al quinto día después de un evento de lluvia, que las respuestas en las descargas de los drenes ocurrieron en el siguiente orden: 10, 20, 50, 30 y 35 m por efecto de espaciamiento (Figura 51).

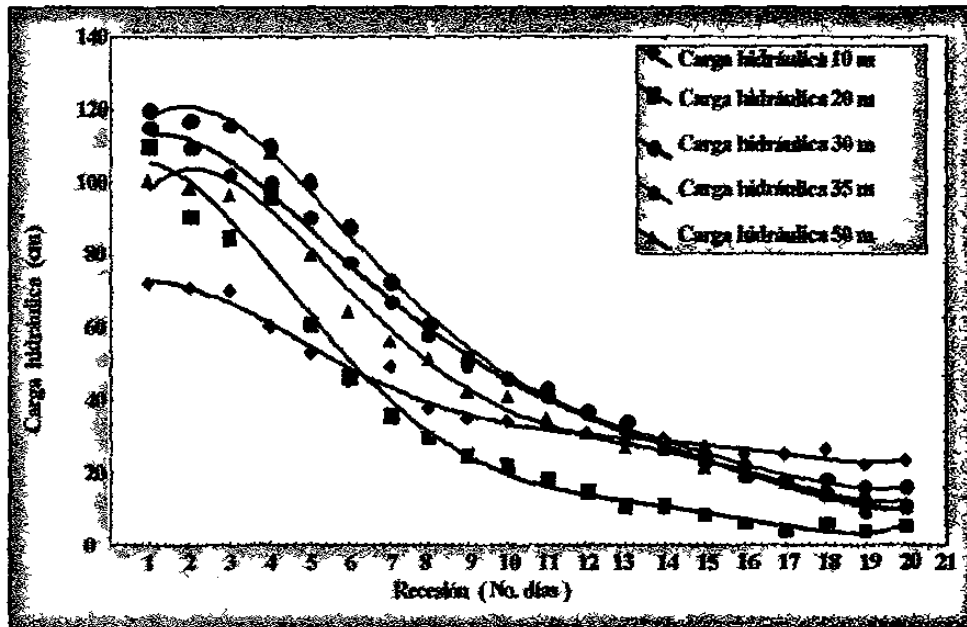


Figura 51. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote C-7 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

#### 4.2.2.6.3. Lote D-6

El lote D-6 con espaciamientos de 30 y 40 m sembrados con maíz (*Zea mays* L.) y caña de azúcar (*Sacharum officinarum*), respectivamente; alcanzaron valores de 120 cm de carga hidráulica en el punto medio entre drenes; mientras, que los coeficientes de drenaje presentaron valores de 12 y 15 mm día<sup>-1</sup> (Figuras 52 y 53). Después de un evento de lluvia de 75.5 mm se pudo observar un período de recesión de 9 y 2 días en los espaciamientos, esta diferencia en tiempo pudo deberse al efecto que tiene la evapotranspiración de los cultivos, ya que la caña de azúcar se encontraba en madurez fisiológica y con dosel cerrado (Figura 54).

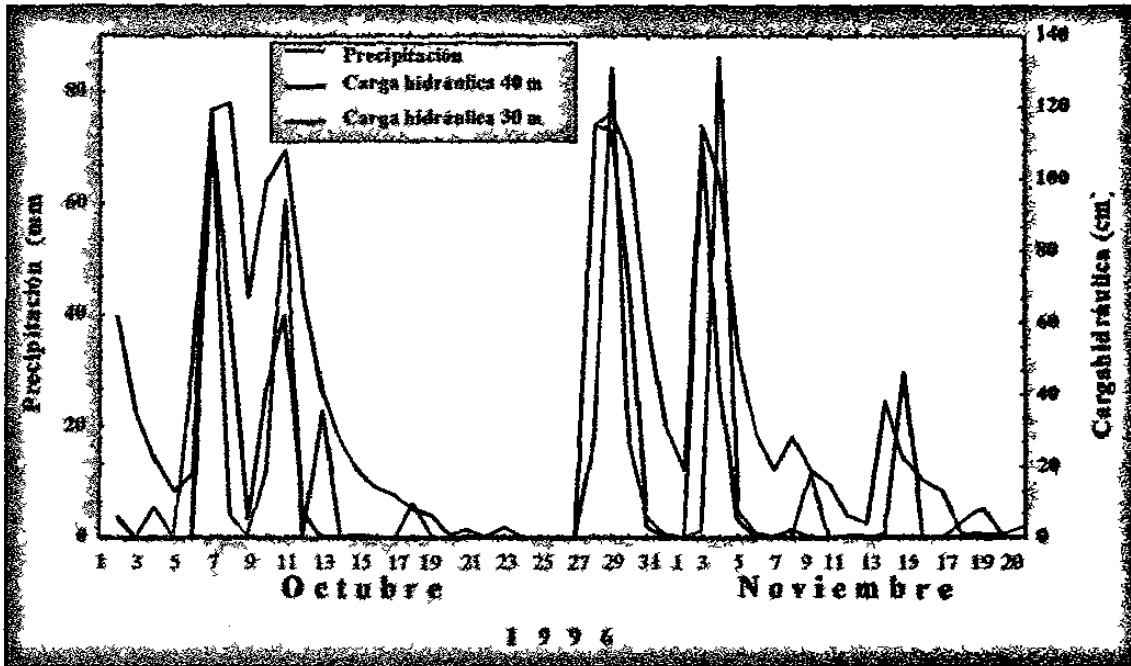


Figura 52. Hidrograma de la precipitación pluvial y la carga hidráulica en el punto medio entre drenes para los espaciamientos de 30 y 40 m (Lote D-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

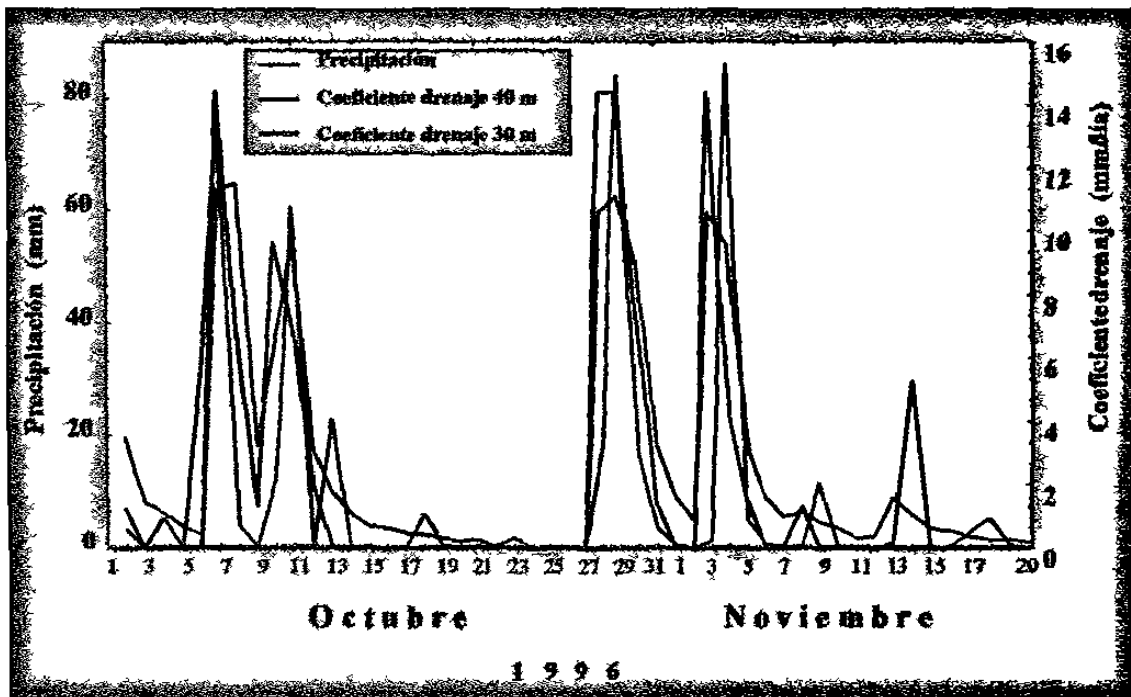


Figura 53. Hidrograma de la precipitación pluvial y los coeficientes de drenaje para los espaciamientos de 30 y 40 m (Lote D-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

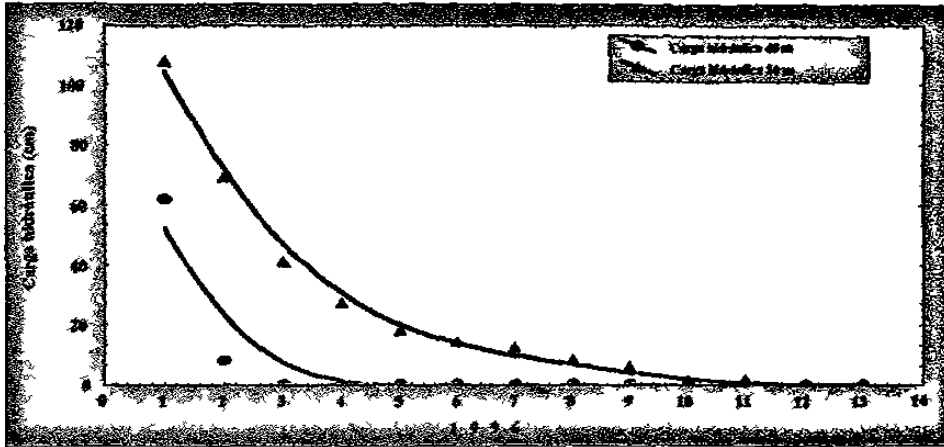


Figura 54. Tiempo de recesión para los espaciamientos de 30 y 40 m correspondientes a las condiciones de manejo del lote D-6 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

#### 4.2.2.6.4. Lote C-6

El lote C-6 con un espaciamiento de 30 m y sembrado con caña de azúcar presentó tres periodos. Durante el primer periodo no existió recarga al manto freático y por lo tanto sin presencia de descargas. En el segundo periodo después de un evento de lluvia de 75.5 mm presentó una carga hidráulica de 115 cm y coeficientes de drenaje de 18 mm día<sup>-1</sup> (Figura 55). El tercer periodo o recesión presentó una duración de 9 días (Figura 56); aunque se observó que en el primer día la carga hidráulica disminuyó hasta 60 cm mostrando alta capacidad para drenar el agua en menos tiempo, esto pudo deberse a que los drenes tienen un filtro de arena que influye en la rapidez con que se desaloja el agua; además, de la elevada evapotranspiración potencial del cultivo sembrada en dicho lote.

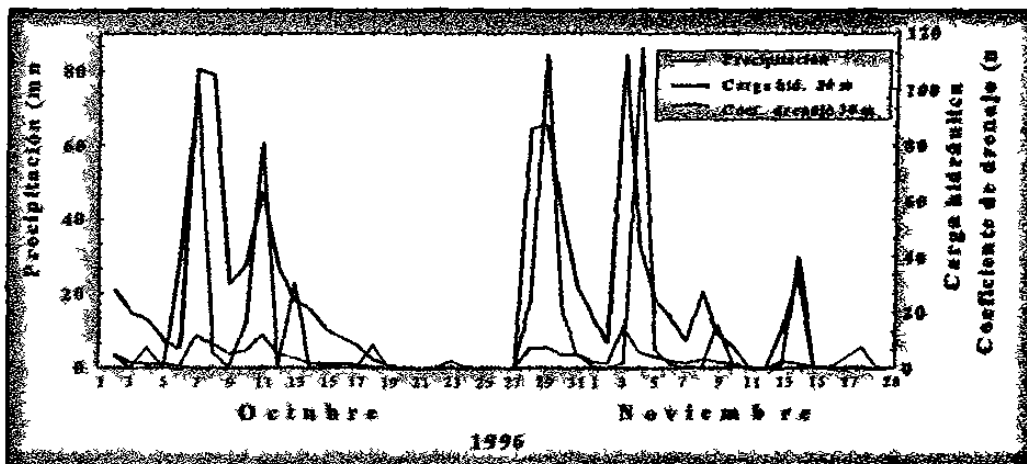


Figura 55. Relación entre precipitación pluvial, carga hidráulica en el punto medio entre drenes y coeficiente de drenaje para el espaciamiento de 30 m (Lote C-6). 1o de Octubre al 20 de Noviembre de 1996.

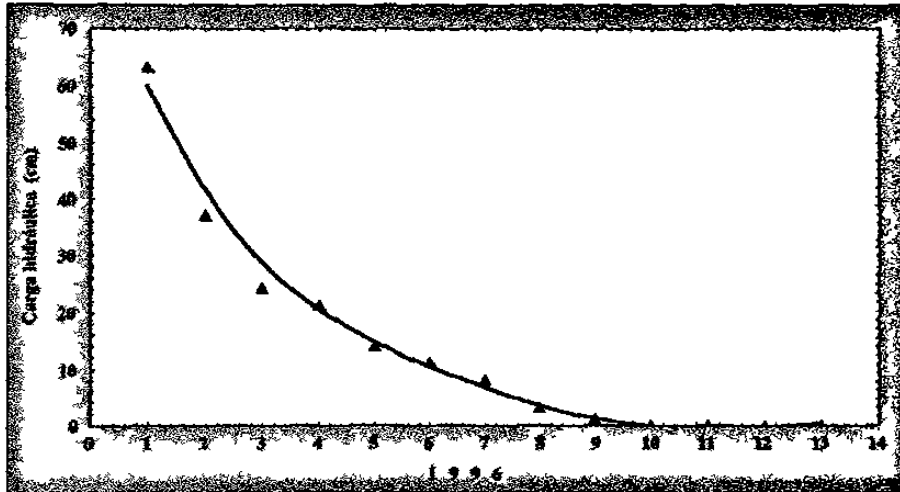


Figura 56. Tiempo de recesión para el espaciamiento de 30 m correspondiente a las condiciones de manejo del lote C-6 para un evento de lluvia de 75.5 mm.

#### 4.2.2.7. Conductividad hidráulica

La variación en la relación entre las descargas de drenes y cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes fueron pequeñas en el período de recesión, semejando a las condiciones de flujo estabilizado. Bajo esas condiciones la aplicación de la teoría de

Hooghoudt  $q = \frac{8K_2 d \Delta h}{L^2} + \frac{4K_1 \Delta h^2}{L^2}$  dió como resultado curvas parabólicas, lo cual

muestra que la relación descarga-carga hidráulica no es lineal sino cuadrática, por lo que el término  $h^2$  es más importante que  $h$ , consecuentemente, la mayor parte del flujo de las aguas subterráneas fluye por encima del nivel de los drenes indicando que los drenes están colocados sobre o cerca del estrato impermeable.

##### 4.2.2.7.1. Lote D-5

Las relaciones funcionales de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes, así como los valores resultantes de conductividad hidráulica demuestran que el flujo del agua en el lote D-5 se produce tanto por encima como por debajo del nivel de los drenes, siendo la intensidad de dicho flujo más elevado en la parte superior para todos los espaciamientos (0.707, 1.750, 1.890, 3.080 y 1.237 m día<sup>-1</sup>) (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote D-5.

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.009517$	2.089	0.04	0.111
$\beta_1 = 0.000283$	2.603	0.01	0.707
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.012209$	3.035	0.003	0.359
$\beta_1 = 0.000175$	1.788	0.050	1.750
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.002581$	3.437	0.001	0.152
$\beta_1 = 0.000084$	7.499	0.000	1.890
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.004623$	4.599	0.000	0.479
$\beta_1 = 0.000077$	4.060	0.000	0.308
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	(niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.002778$	4.321	0.000	0.405
$\beta_1 = 0.001980$	14.915	0.000	1.237

Los valores de K para  $\beta_0$  y  $\beta_1$  corresponden al flujo horizontal del agua por debajo y por encima del nivel de los drenes

Las relaciones existentes entre las descargas de drenes y cargas hidráulicas representadas gráficamente mostraron que el espaciamiento de 40 m (Figura 60) presentó curvatura menos pronunciada que los espaciamientos de 10, 20, 30 y 50 m (Figuras 57, 58, 59, 61 y Cuadro A2); esto indica que el flujo fue más intenso en la parte superior a los drenes subterráneos para los espaciamientos de 10, 20, 30 y 50 m que en el de 40 m. Este efecto puede ser explicado porque el espaciamiento de 40 m se encuentra ubicado en la serie de suelo Limón, la cual presenta textura arcillosa del tipo montmorillonítica en todo el perfil; mientras que los espaciamientos restantes se localizan dentro de la serie de suelo Libertad que tiene textura franco-arcillosa en los primeros estratos y cambia a texturas medias a partir de los 50 cm.

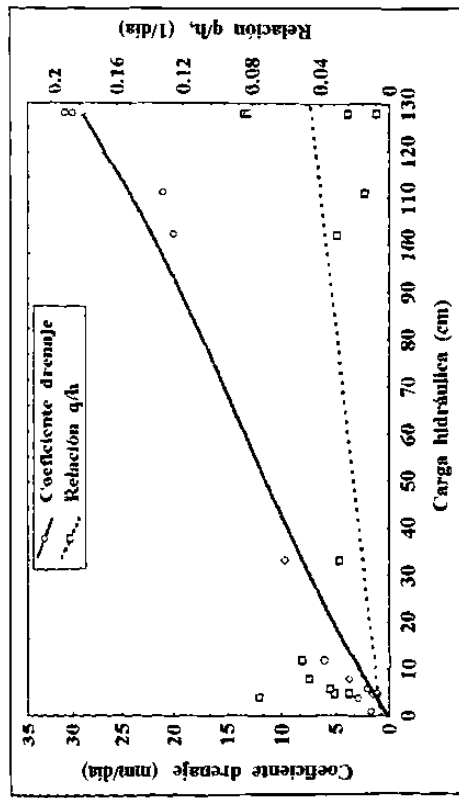


Figura 57. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) y para el espaciamiento de 10 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.

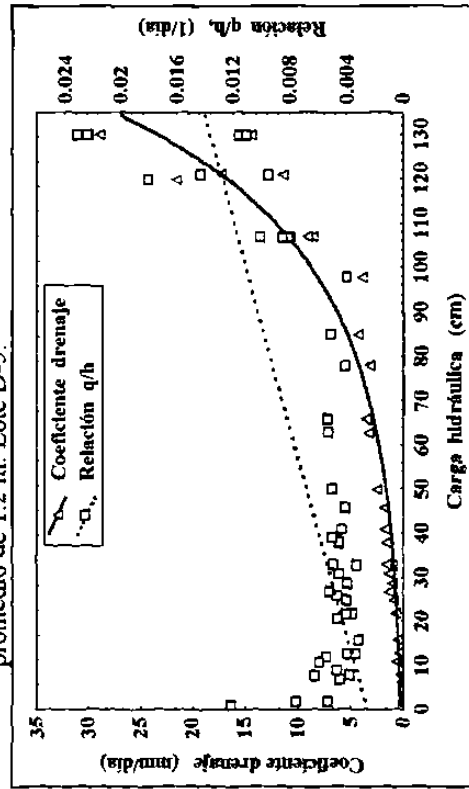


Figura 59. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.

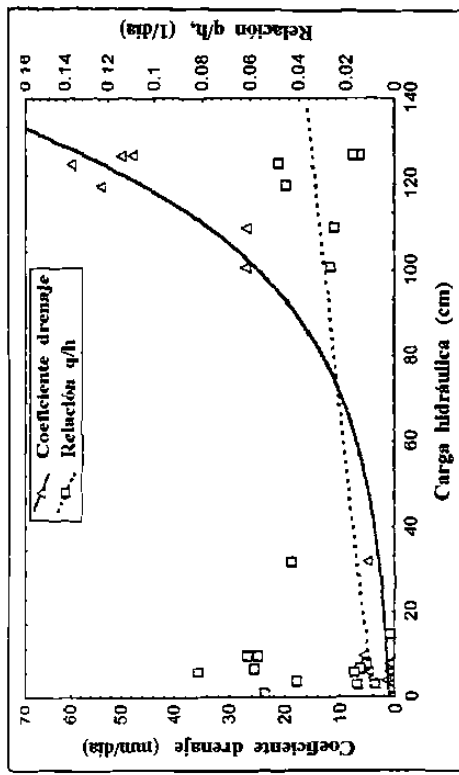


Figura 58. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 20 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.

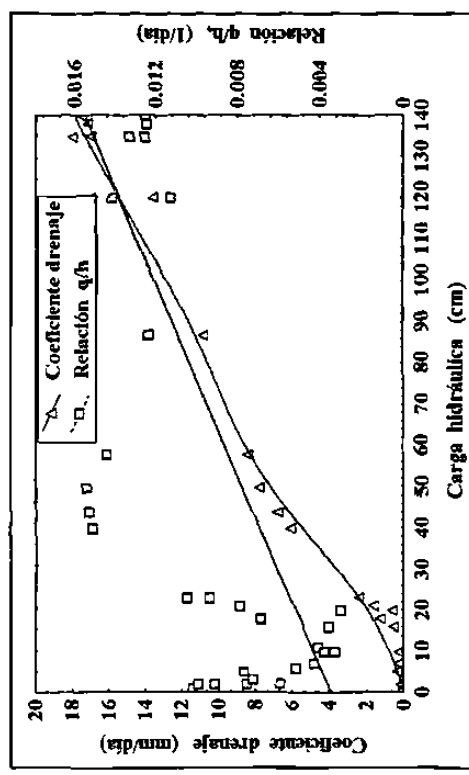


Figura 60. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 40 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-5.



## 8. APENDICE

**Cuadro A1. Lluvia promedio diaria del mes de Septiembre para las 86 estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco, México.**

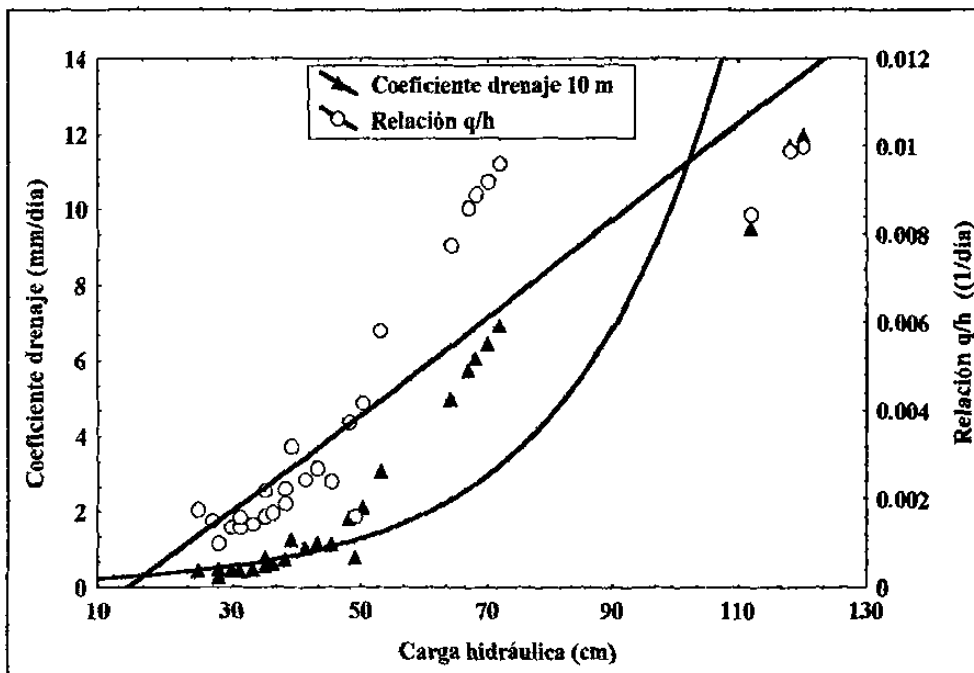
Nombre Estación	Longitud W Grados	Latitud N Grados	Elevación Metros	Promedio	Varianza	Desviación Estándar	Coefficiente variación
EST27001	92.32	17.48	18.00	11.7	581.7	24.11	2.05
EST27002	92.43	18.28	18.00	8.34	291.12	17.06	2.04
EST27003	93.56	18.06	18.00	11.17	388.76	19.71	1.76
EST27004	91.31	17.26	100.00	14.05	560.55	23.67	1.68
EST27006	91.27	18.00	100.00	11.72	393.46	19.83	1.69
EST27007	93.37	18.00	100.00	11.06	441.70	21.01	1.89
EST27008	93.22	18.01	21.00	10.99	453.22	21.28	1.93
EST27009	93.13	18.16	10.00	10.40	433.06	20.81	1.99
EST27010	93.11	18.04	10.00	9.81	439.60	20.96	2.13
EST27011	92.50	17.36	60.00	22.26	0.77	0.87	0.03
EST27012	91.46	17.45	60.00	12.22	479.54	21.89	1.79
EST27013	93.29	18.18	60.00	10.19	458.95	21.42	2.10
EST27014	92.56	18.01	60.00	8.52	255.58	15.98	1.87
EST27015	93.54	17.50	7.00	13.44	453.79	21.30	1.58
EST27016	92.39	18.32	1.00	9.33	583.38	24.15	2.58
EST27017	93.24	17.50	193.00	11.28	499.91	22.35	1.98
EST27018	93.28	17.52	193.00	10.52	560.85	23.68	2.24
EST27019	92.48	17.47	193.00	13.13	393.90	19.84	1.51
EST27020	93.03	18.12	193.000	8.56	349.61	18.69	2.18
EST27021	91.17	17.37	14.00	10.82	295.55	17.19	1.58
EST27022	92.34	17.37	14.00	16.77	635.79	25.21	1.50
EST27023	93.48	17.50	14.00	24.34	1136.62	33.71	1.38
EST02724	92.55	17.45	14.00	13.06	419.56	20.48	1.56
EST27025	92.55	17.59	14.00	10.28	294.19	17.15	1.66
EST27026	94.01	18.08	14.00	10.97	309.38	17.58	1.60
EST27027	92.41	17.36	14.00	15.04	509.88	22.58	1.50
EST27028	92.09	18.06	14.00	10.85	442.68	21.04	1.93
EST27029	92.50	18.10	14.00	8.87	288.19	16.97	1.91
EST27030	92.35	17.46	68.00	12.68	429.39	20.72	1.63
EST27031	92.36	17.45	60.00	11.42	651.39	25.52	2.23
EST27032	93.25	17.38	60.00	13.50	454.47	21.31	1.57
EST27033	93.38	17.44	100.00	11.47	380.39	19.50	1.69
EST27034	93.13	18.24	100.00	8.98	337.05	18.35	2.04
EST27035	93.22	17.41	100.00	12.22	421.27	20.52	1.67
EST27036	93.07	18.00	100.00	10.37	374.48	19.35	1.86
EST27037	92.54	17.50	60.00	11.20	365.87	19.12	1.70
EST27038	93.04	18.19	72.00	9.56	337.63	18.37	1.92
EST27039	93.16	18.01	72.00	11.01	414.96	20.37	1.84
ETS27040	91.10	17.46	21.00	9.53	301.13	17.35	1.81
EST27041	92.32	18.06	21.00	10.80	455.54	21.34	1.97
EST27042	92.47	17.28	60.00	18.43	730.46	27.02	1.46
EST27043	92.49	17.36	60.00	13.63	366.01	19.13	1.40
EST27044	92.58	17.33	72.00	19.79	843.78	29.04	1.46
EST27045	92.57	17.33	50.00	19.99	1011.70	31.80	1.59
EST27046	91.26	17.29	600.00	13.09	528.74	22.99	1.75

tendencias e intensidad del flujo del agua es debida a que los drenes subterráneos están instalados en la Serie Limón.

**Cuadro 11.** Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote C-7.

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = -0.001233$	-3.025	0.003	0.013
$\beta_1 = 0.000105$	13.381	0.000	0.262
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.002854$	4.469	0.000	0.086
$\beta_1 = 0.000063$	5.119	0.000	0.630
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = -0.000370$	-0.785	0.436	0.021
$\beta_1 = 0.000077$	11.626	0.000	1.732
Espaciamiento entre drenes: 35 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.000300$	0.005	0.995	0.020
$\beta_1 = 0.000041$	5.717	0.000	1.250
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = -0.003498$	-6.523	0.000	0.466
$\beta_1 = 0.000130$	15.735	0.000	0.800

Los valores de K para  $\beta_0$  y  $\beta_1$  corresponden al flujo horizontal del agua por debajo y por encima del nivel de los drenes.



**Figura 62.** Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 10 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

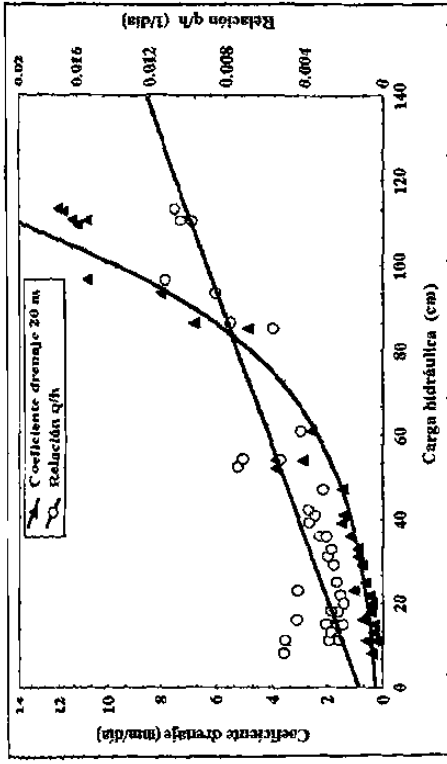


Figura 63. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 20 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

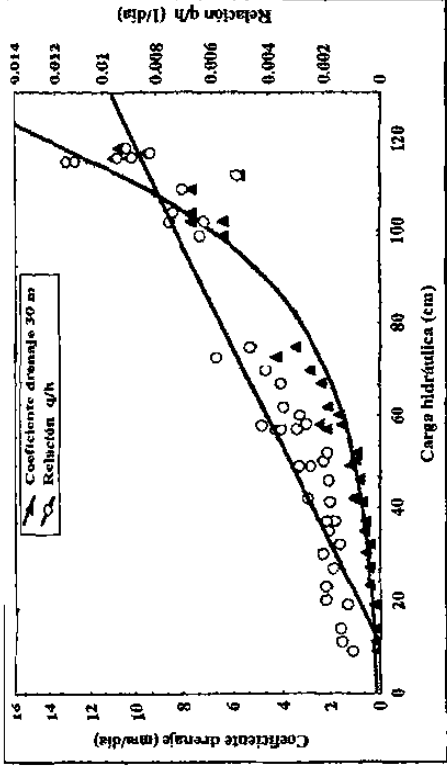


Figura 64. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

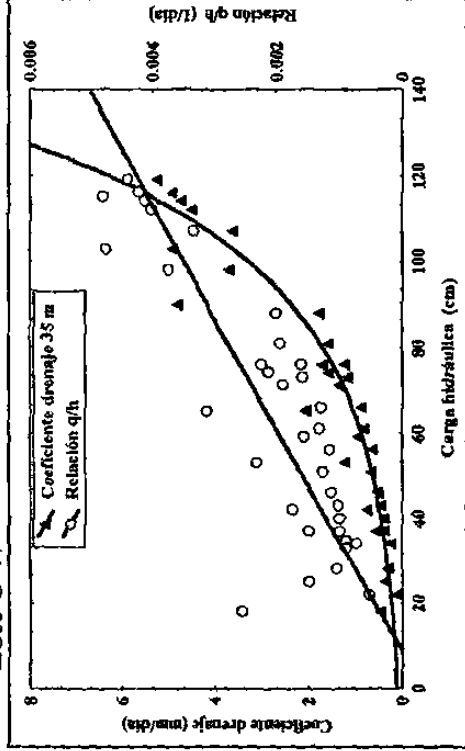


Figura 65. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 35 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

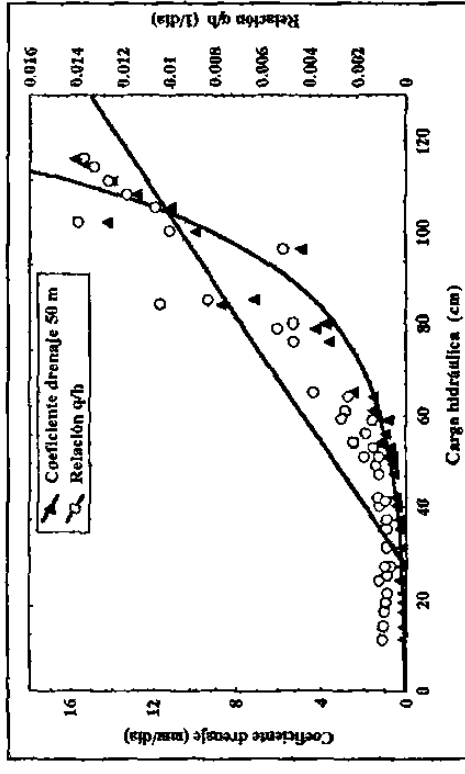


Figura 66. Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 50 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-7.

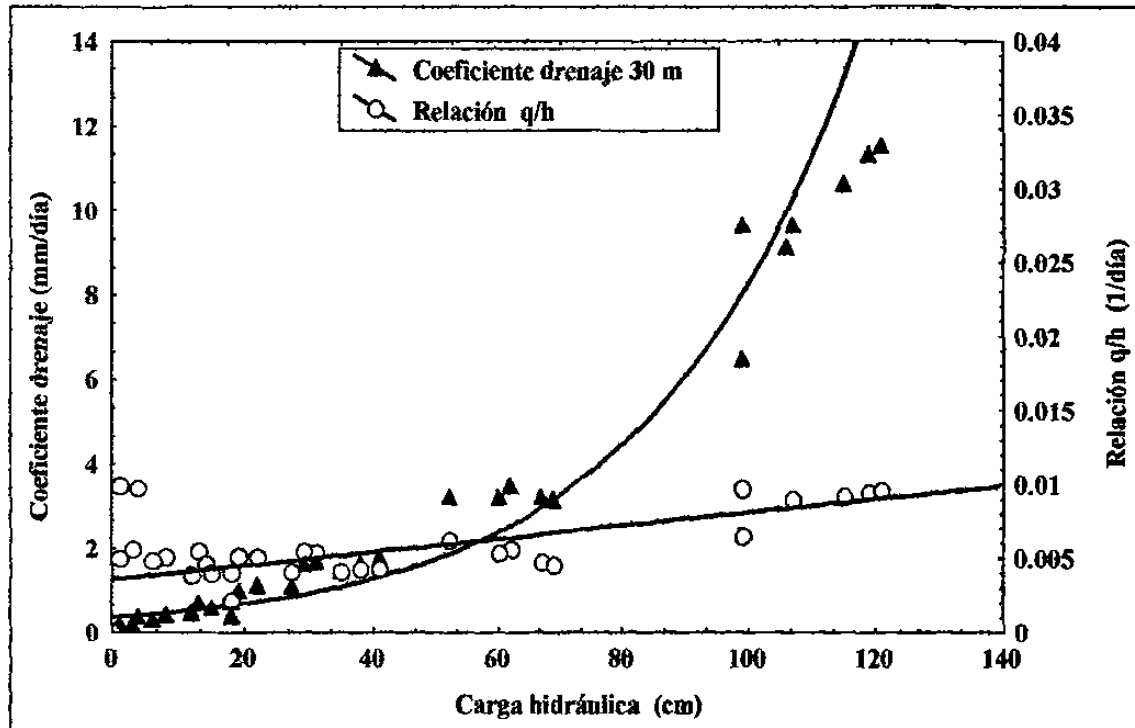
### 4.2.2.7.3. Lote D-6

En el lote D-6 los espaciamientos de 30 y 40 m sembrados con maíz y caña de azúcar, respectivamente, se encontraron valores de conductividad hidráulica ligeramente más altos en la parte inferior del estrato con respecto al nivel de los drenes subterráneos, por lo que el flujo del agua en esta parte es más rápido que en los primeros estratos con respecto al nivel del suelo (Cuadros 12, A4 y Figuras 67 y 68).

**Cuadro 12.** Valores de conductividad hidráulica estimados con el método de la relación carga hidráulica en el punto medio entre drenes y descarga de drenes. Lote D-6.

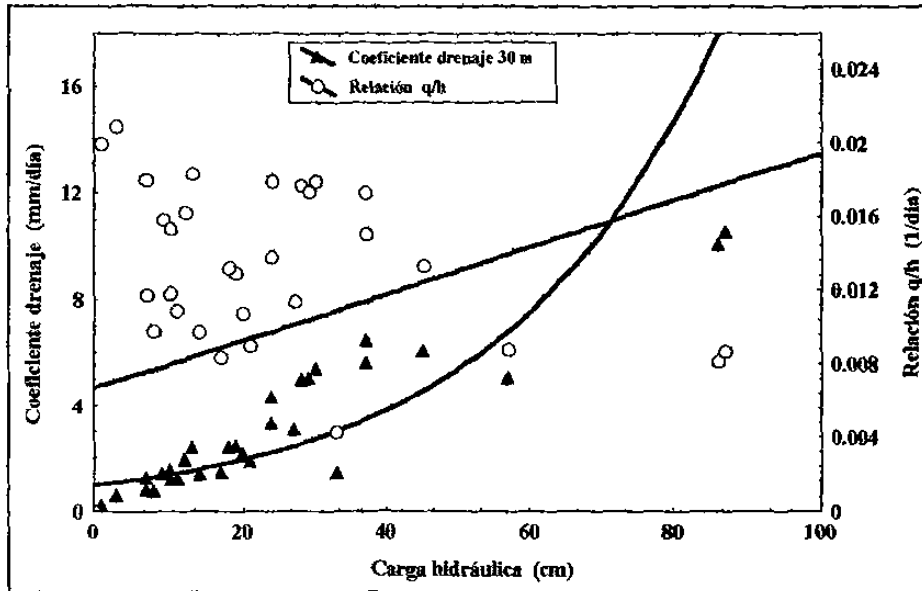
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Coef. Regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.006552$	5.238	0.000	0.190
$\beta_1 = 0.000009$	0.407	0.685	0.090
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Coef. regresión	$t_{calculada}$	p (niv. de prob.)	K (m día <sup>-1</sup> )
$\beta_0 = 0.005313$	2.610	0.011	0.475
$\beta_1 = 0.000088$	1.633	0.108	0.352

Los valores de K para  $\beta_0$  y  $\beta_1$  corresponden al flujo horizontal del agua por debajo y por encima del nivel de los drenes.



**Figura 67.** Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h) y el coeficiente de drenaje (q) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote D-6.

EST27047	91.26	17.29	60.00	11.09	473.53	21.76	1.96
EST27048	92.21	17.49	600.00	13.50	509.98	22.58	1.67
EST27049	93.44	17.52	600.00	8.82	209.26	14.46	1.63
EST27050	92.38	18.25	30.00	9.41	343.35	18.52	1.96
EST27051	93.17	18.10	30.00	11.45	497.27	22.29	1.94
EST27052	93.28	18.26	30.00	9.62	376.34	19.39	2.01
EST27053	92.55	18.23	30.00	10.22	529.76	23.01	2.25
EST27054	92.57	17.59	10.00	11.49	401.58	20.03	1.74
EST27055	92.55	17.59	10.00	11.86	526.46	22.94	1.93
EST27056	91.33	17.49	18.00	10.6	453.00	15.69	1.48
EST27057	93.13	18.16	10.00	10.01	721.70	26.86	2.68
EST27059	91.10	17.57	60.00	9.45	323.64	17.99	1.90
EST27060	92.59	17.56	1.00	10.48	485.43	22.03	2.10
EST27061	92.56	17.32	72.00	19.60	1018.15	31.90	1.62
EST27063	91.04	17.36	10.00	10.84	410.96	20.27	1.86
EST27064	91.01	17.50	10.00	14.01	477.64	21.85	1.55
EST27065	92.55	17.59	10.00	13.33	417.92	20.44	1.53
EST27066	91.01	17.17	60.00	10.00	450.00	17.00	1.70
EST27067	91.26	17.29	60.00	9.85	346.16	18.60	1.88
EST27069	91.46	17.52	21.00	9.79	320.57	17.90	1.82
EST27070	92.45	17.22	100.00	17.71	727.09	26.96	1.52
EST27071	92.25	17.46	58.00	9.08	314.38	17.73	1.95
EST27073	92.25	18.18	100.00	9.87	365.41	16.29	1.64
EST27074	93.33	18.18	100.00	11.12	336.86	18.35	1.64
EST27075	93.29	18.14	100.00	10.03	208.73	14.44	1.43
EST27076	93.35	18.14	100.00	10.22	277.90	16.67	1.63
EST27077	93.33	18.09	100.00	11.76	309.59	17.59	1.49
EST27078	93.25	18.04	100.00	13.87	814.45	28.53	2.05
EST27079	93.25	18.03	100.00	11.76	359.95	18.97	1.61
EST27080	93.25	17.58	100.00	12.61	530.17	23.02	1.82
EST27081	92.41	17.47	55.00	4.47	54.11	7.35	1.64
EST27084	93.00	18.22	100.00	7.34	199.39	14.12	1.92
EST27085	92.45	18.30	60.00	11.33	655.26	25.59	2.25
EST27087	91.23	17.59	193.00	4.46	56.56	7.52	1.68
EST27088	91.32	17.52	14.00	3.88	93.87	9.68	2.49
EST27090	91.36	17.58	60.00	9.46	318.13	17.83	1.88
EST27091	91.48	17.56	100.00	7.49	143.26	11.96	1.59
EST27092	92.55	17.50	100.00	11.71	179.95	13.41	1.14
EST27093	91.34	18.00	21.00	5.86	142.95	11.95	2.03



**Figura 69.** Relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ) y el coeficiente de drenaje ( $q$ ) para el espaciamiento de 30 m entre drenes y profundidad de drenes promedio de 1.2 m. Lote C-6.

En forma general se puede decir que los valores de conductividad hidráulica en todos los espaciamientos son más altos en los estratos superiores que en los inferiores con respecto al nivel de la instalación de los drenes. El flujo del agua es más intenso en la parte de arriba que en la parte de abajo. El lote C-7 presenta los valores más bajos de conductividad hidráulica, lo que hace que la recesión sea más lenta que en los lotes D-5, D-6 y C-6.

#### 4.2.2.8. Espacio poroso drenable

En forma general se observó que el espacio poroso drenable se incrementó conforme la carga hidráulica disminuyó, ya que un cambio en el nivel del manto freático equivale a la porosidad efectiva de la zona del suelo en que tienen lugar las fluctuaciones. Kessler y Ridder (1978) mencionan que el espacio poroso drenable es más bajo para la arcilla y materiales arcillosos (0.5 a 5%) y más alto para arenas gruesas (20 a 35%); estos valores coinciden con los encontrados en los diferentes lotes para suelos arcillosos.

#### 4.2.2.8.1. Lote D-5

El variable espacio poroso drenable en el lote D-5 y sin cultivo en los espaciamientos de 10, 20, 30 y 50 m mostró valores similares (2.29 a 2.45%) mientras que el espaciamiento de 40 m presentó un espacio poroso drenable de (1.25%); esta diferencia pudo deberse a que los espaciamientos se encuentran ubicados dentro de dos tipos de suelos diferentes, los primeros espaciamientos se localizan en la serie de suelos Libertad y el espaciamiento de 40 m en la serie de suelos Limón que de acuerdo a sus características físicas y químicas, el flujo del agua es considerado como lento, ya que el espacio poroso drenable varía con el tamaño forma y distribución de las partículas del suelo (Cuadro 14).

**Cuadro 14.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ), Lote D-5 (Sin Cultivo- Serie Libertad y Limón).

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
02 - 130	1280	30.0	2.34
97 - 130	330	9.67	2.93
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
20 - 130	1100	27	2.45
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
00 - 130	1300	30.0	2.30
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
00 - 130	1300	17.0	1.25
86 - 130	440	6.75	1.53
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
14 - 130	1160	26.6	2.29
47 - 130	830	19.2	2.31

#### 4.2.2.8.2. Lote C-7

Considerando un espesor de 1 m de profundidad con respecto al nivel del suelo, los espaciamientos de 10, 20, 30, 35 y 50 m del lote C-7 presentaron valores similares de espacio poroso drenable (1.44, 1.04, 1.32, 1.43 y 1.52), respectivamente; estos valores concuerdan con los reportados para suelos arcillosos por Martínez (1978) (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ). Lote C-7 (Cultivo Maíz- Serie Limón).

Espaciamiento entre drenes: 10 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
72 – 92	200	1.80	0.90
92 – 99	70	1.01	1.44
Espaciamiento entre drenes: 20 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
48 – 59	110	1.03	0.93
59 – 66	70	0.73	1.04
Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
36 – 55	190	2.50	1.31
55 – 64	90	1.19	1.32
Espaciamiento entre drenes: 35 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
79 – 89	100	0.65	0.65
89 – 94	50	0.51	1.02
94 – 97	30	0.43	1.43
Espaciamiento entre drenes: 50 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
57 – 73	160	2.15	1.34
73 – 81	80	1.22	1.52

#### 4.2.2.8.3. Lote D-6

Aún cuando los valores de espacio poroso drenable tuvieron poca variación (0.8 y 1.0%) en ambos espaciamientos (30 y 40 m) sembrados con maíz y caña de azúcar en este lote; se puede observar que existió un efecto causado por la evapotranspiración del cultivo en cada espaciamiento, ya que cada cultivo requiere o tiene diferentes necesidades hídricas (Cuadro 16).

**Cuadro 16.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ). Lote D-6 (Cultivos Caña de azúcar y Maíz – Serie Limón).

Espaciamiento entre drenes: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
22 – 61	390	3.12	0.20
61 – 89	280	1.75	0.62
89 – 103	140	1.11	0.79
103 – 112	90	0.72	0.80
Espaciamiento entre drenes: 40 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
68 – 130	620	6.39	1.03
60 – 130	700	7.06	1.00



#### 4.2.2.8.4. Lote C-6

Esta área de drenaje con un espaciamiento de 30 m, sembrado con caña de azúcar y ubicada en la serie Limón, su espacio poroso drenable fue de 2.4%, este valor es alto con los encontrados en esta misma serie de suelos de los otros lotes; esto puede explicarse porque en este espaciamiento los drenes subterráneos tienen arena como filtro envolvente, lo que hace que haya una mayor velocidad del flujo del agua hacia los drenes (Cuadro 17). Cabe mencionar que aún cuando los dos tipos de suelos son de origen aluvial reciente, existen diferencias en los valores de espacio poroso drenable por efecto del tipo de suelo y por manejo con el cultivo. Realizando una comparación con la serie Libertad sin cultivo y el espaciamiento de 30 m se encontraron valores de 2.3% (Lote D-5); mientras que en la serie Limón cultivada con maíz y espaciamiento de 30 m (Lote C-7) los valores fueron de 1.3%, esta diferencia es por efecto en el manejo del suelo y cambios en la estructura.

El lote D-5 contra el lote D-6 ambos con espaciamiento de 40 m e igual serie de suelos (Limón) pero con diferente manejo (sin cultivo y con caña de azúcar, respectivamente), se encontraron valores de 1.25 y 1.03%, esta diferencia se debió a que el lote D-5 se mantuvo barbechado y rastreado lo cual permitió la disgregación de la estructura del suelo y por lo tanto un mayor espacio poroso drenable.

**Cuadro 17.** Valores de espacio poroso drenable ( $\mu$ ) estimados con el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $\Delta h$ ) y la descarga de drenes ( $Dr$ ). Lote C-6 (Cultivo Caña-Serie Limón).

Espaciamiento: 30 m			
Espesor del horizonte (cm)	$\Delta h$ (mm)	$Dr$ (mm día <sup>-1</sup> )	$\mu$ (%)
73 – 101	280	5.04	1.8
101 – 111	100	2.45	2.4

#### 4.2.2.9. Transmisividad

En el módulo de drenaje la variable transmisividad fue evaluada como el producto de la conductividad hidráulica y el estrato permeable; los valores mostraron un rango de 0.527 hasta 5.111 m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>. Como puede observarse la transmisividad está en función de la conductividad hidráulica y ésta depende de factores entre los que destacan: geometría de los poros, naturaleza de la superficie de las partículas, textura, estructura, densidad, materia

orgánica y tipo de mineral de la arcilla. Estas características hacen que el flujo hídrico en medios porosos bajo condiciones naturales se comporten diferentes en espacio y tiempo (Huan y Shan, 1993). Sin embargo las variaciones de transmisividad presentes en los diferentes espaciamientos se debió a que el estrato permeable fluctuó en un rango de 3.7 hasta 5.0 m (Cuadros 18 a 21).

**Cuadro 18.** Valores de transmisividad lote D-5 (Sin cultivo – Series Libertad y Limón).

Lote D-5					
Variables	Espac. 10 m	Espac. 20 m	Espac. 30 m	Espac. 40 m	Espac. 50 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	3.70	4.85	4.02	4.07	4.30
Cond. hidráulica (m día <sup>-1</sup> )	0.409	1.054	1.021	0.393	0.821
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	1.513	5.111	4.104	1.599	3.530

**Cuadro 19.** Valores de transmisividad lote C-7 (Cultivo maíz . Serie Limón).

Lote C-7					
Variable	Espac. 10 m	Espac. 20 m	Espac. 30 m	Espac. 35 m	Espac. 50 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	5.00	3.70	4.40	3.93	4.45
Cond. Hidráulica (m día <sup>-1</sup> )	0.137	0.716	0.876	0.635	0.633
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.685	2.649	3.854	2.495	2.816

**Cuadro 20.** Valores de transmisividad lote D-6 (Cultivos maíz y caña de azúcar – Serie Limón).

Lote D-6		
Variable	Espac. 30 m	Espac. 40 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	3.77	4.03
Cond. Hidráulica (m día <sup>-1</sup> )	0.140	0.413
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	0.527	1.664

**Cuadro 21.** Valores de transmisividad del lote C-6 (Cultivo caña de azúcar – Serie Limón).

Lote C-6	
Variable	Espaciamiento 30 m
Distancia al estrato semipermeable (m)	4.25
Conductividad hidráulica (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	1.119
Transmisividad (m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	4.755

### 4.2.3. Cultivos

#### 4.2.3.1. Maíz (*Zea mays L.*)

En el módulo de drenaje en sus diferentes espaciamientos se han evaluado las respuestas de diversos cultivos. El presente trabajo se realizó en el ciclo agrícola temporal 1996; donde se estimó el rendimiento de grano en maíz, encontrando efecto de espaciamiento entre drenes y que el mejor fue el de 30 m con un rendimiento de 2.7 t ha<sup>-1</sup> (Cuadro 22).

**Cuadro 22.** Estadísticas de producción del cultivo de maíz (Híbrido: A-775) en diferentes espaciamientos de drenes subterráneos en el módulo de drenaje. Región Chontalpa. Ciclo agrícola de temporal 1996.

Espaciamiento entre drenes (m)	Rendimiento de grano (t ha <sup>-1</sup> )
10	1.93
20	2.35
30	2.70
35	2.15
50	2.48

#### 4.2.3.2. Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)

La caña de azúcar es un cultivo de importancia económica que se siembra en la Planicie Aluvial de Tabasco. Desde 1992 se ha venido evaluando el rendimiento de esta gramínea en los diferentes espaciamientos del módulo de drenaje. La presente investigación se llevó a cabo durante el ciclo agrícola 1995/96 y 1996/97 período donde los rendimientos de plantilla y soca fueron de 92.62 y 86.85 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Los resultados encontrados por diferentes investigadores desde 1992 a 1997 han mostrado diferencias en rendimientos en el cultivo y han coincidido que en el espaciamiento de 30 m se han obtenido los mejores rendimientos (Carrillo, 1995a; Melo, 1994; Lagunes *et al.*, 1995; Salgado *et al.*, 1994; Váldez, 1997). Las variaciones en el rendimiento reportadas por éstos investigadores pueden ser debidas a efectos de espaciamiento, diferentes tipos de suelos en los lotes, fertilización y condiciones climáticas presentes durante el ciclo de cultivo (Cuadro 23).

**Cuadro 23.** Estadísticas de producción del cultivo de caña de azúcar ( $t\ ha^{-1}$  en el híbrido: Mex 69-290) en diferentes espaciamientos de drenes subterráneos en el módulo de drenaje. Región Chontalpa.

Año	Lote	Ciclo	Espaciamientos					
			10 m	20 m	30 m	35 m	40 m	50 m
1992/93	C-7	Plantilla	124.8	119.8	140.6	92.9		
1993/94	C-7	Soca	81.6	81.1	97.6	77.9		
1992/94	D-5	Plantilla	142.2	129.3	158.6		159.1	134.8
1994/95	D-5	Soca	82.1	112.4	81.9		67.94	113.9
1994	D-5	Plantilla	144.0	139.0	157.0		154.0	129.0
1995/96	D-6	Plantilla					92.62	
1996/97	D-6	Soca					86.85	

#### 4.2.4. Balance de agua

El balance parcial de agua durante la fase de recesión (Cuadro 24) se realizó en el espaciamiento de 20 m del lote D-5 (Sin cultivo), que abarca dos series de suelos. Limon y Libertad (Figura 13). Para la estimación de los parámetros de los componentes del balance se utilizó el periodo estacional de mayor precipitación pluvial (Septiembre-Octubre), dividiéndose a su vez en cuatro periodos de observación (recesión), se consideró la precipitación pluvial (PP) como único componente de entrada al modelo y se encontró que el 41.43% de la precipitación fue desalojada por los drenes subterráneos (Dr), el 15.3% fueron pérdidas por evaporación del suelo (Ev), el 29.73% se transformó en escurrimiento superficial, el 13.54% restante es almacenado en el suelo debido al proceso de infiltración. El contenido de humedad del suelo se mantuvo cerca o a capacidad de campo durante los periodos de observación.

**Cuadro 24.** Balance parcial de agua en la fase de recesión sin cultivo, con espaciamiento de 20 m. Lote D-5.

Período	PP (mm)	Dr (mm)	Ev (mm)	Ev media (mm día <sup>-1</sup> )	Escorrentía (mm)	$\Delta h$ y recarga acuífero (mm)
1/oct/96 - 8/oct/96	119.10	38.10	14.74	1.63	8.07	58.19
10/oct/96 - 22/oct/96	101.78	58.73	32.49	2.49	10.56	0
3/nov/96 - 7/nov/96	105.30	58.88	10.34	2.06	36.08	0
9/nov/96 - 15/nov/96	103.60	22.39	8.11	1.15	73.10	0
<b>Total</b>	<b>429.78</b>	<b>178.1</b>	<b>65.68</b>	<b>7.33</b>	<b>127.81</b>	<b>58.19</b>
<b>%</b>		<b>41.43%</b>	<b>15.30%</b>		<b>29.73%</b>	<b>13.54%</b>

### 4.3. Tercera etapa

#### 4.3.1. Modelos

##### 4.3.1.1. Modelo de regresión lineal simple y múltiple para coeficiente de drenaje

En el análisis de regresión lineal simple y múltiple, mediante el procedimiento de selección del modelo por stepwise, en donde intervienen la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ), conductividad hidráulica ( $K$ ), transmisividad ( $T$ ), precipitación, evaporación, temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad, como variables independientes y el coeficiente de drenaje ( $q$ ) como variable dependiente, se encontró que aún cuando la proporcionalidad de la variabilidad explicada por el modelo (90.58%); solamente las variables  $h$ ,  $K$  y  $T$ , presentaron significancia estadística al 95% de confianza usando prueba de  $t$  (Cuadro 25); es decir, la influencia principal de la fluctuación de la descarga de los drenes está estrechamente correlacionada con la carga hidráulica en el punto medio entre drenes, conductividad hidráulica y transmisividad del acuífero que presenta el suelo de la serie limón con drenes subterráneos de PVC corrugado de 4 pulgadas de diámetro.

**Cuadro 25.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de  $t$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.

Coeficientes de regresión	Variables	Error Estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada
$\beta_0 = -3.6605$		9.504	-0.385	0.702	0.9058
$\beta_1 = 0.0576$	$h$	0.010	5.282	0.000	
$\beta_2 = 6.7779$	$K$	2.112	3.209	0.002	
$\beta_3 = 2.2593$	$T$	0.704	3.001	0.001	
$\beta_4 = -0.0002$	PP	0.018	-0.012	0.989	
$\beta_5 = 0.1072$	Evap	0.144	0.740	0.463	
$\beta_6 = -0.2471$	$T_0$	0.296	-0.834	0.408	
$\beta_7 = -0.0238$	$T_{10}$	0.548	-0.043	0.965	
$\beta_8 = 0.0559$	$T_{20}$	0.555	0.100	0.920	
$\beta_9 = 0.1457$	$T_{50}$	0.614	0.237	0.813	

El análisis de varianza (Cuadro A3) que probó la hipótesis de igualdad entre los coeficientes de regresión ( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ ) del modelo:

$$q = -4.739 + 0.058h + 6.797K + 2.265T \quad (35)$$

mostró alta significancia estadística ( $p=0.000$ ) por lo que existe un efecto importante de: carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ), conductividad hidráulica ( $K$ ) y transmisividad ( $T$ ) sobre el coeficiente de drenaje ( $q$ ); es decir que al menos uno de los coeficientes de regresión es diferente al nivel de significancia del 95%. Como los coeficientes de regresión  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , y  $\beta_3$  son positivos se afirma que a medida que se incrementan los valores de carga hidráulica, conductividad hidráulica y transmisividad, los valores del coeficiente de drenaje también tienden a incrementarse (Cuadro 26). Las tasas de cambio indican que por cada unidad de cambio de la conductividad hidráulica, el coeficiente de drenaje varió en un rango de 6.797 a 19.181  $\text{mm día}^{-1}$ .

**Cuadro 26.** Coeficientes de regresión ( $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$ ), pruebas de t para los coeficientes de regresión, funcionalidad del modelo ( $R^2_{aj}$ ) y características del análisis de varianza de los modelos lineal simple y múltiple donde intervienen como variables independientes:  $h$ ,  $K$  y  $T$  y como variable dependiente,  $q$ .

No. Var	Var	Coef. de regresión estimados ( $\beta_i$ )				$t_{calculada}$	P	$R^2_{aj}$	ANVA		
		$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$				CME	F	p
1	h	-2.388	0.1497	-----	-----	$t_{\beta_0} = -2.71$ $t_{\beta_1} = 11.39$	0.009 0.000	0.72	17.76	129.79	0.000
1	K	-4.694	-----	19.181	-----	$t_{\beta_0} = -7.62$ $t_{\beta_2} = 19.92$	0.000 0.000	0.88	7.12	397.12	0.000
1	T	-4.694	-----	-----	6.393	$t_{\beta_0} = -7.62$ $t_{\beta_3} = 19.92$	0.000 0.000	0.88	7.12	397.11	0.000
2	h, K	-5.106	0.061	14.001	-----	$t_{\beta_0} = -11.68$ $t_{\beta_1} = 7.13$ $t_{\beta_2} = 14.10$	0.000 0.000 0.000	0.94	3.52	426.44	0.000
2	h, T	-5.106	0.061	-----	4.666	$t_{\beta_0} = -11.68$ $t_{\beta_1} = 7.13$ $t_{\beta_3} = 14.10$	0.000 0.000 0.000	0.94	3.52	426.44	0.000
2	K, T	-4.230	-----	9.134	3.044	$t_{\beta_0} = -5.86$ $T_{\beta_2} = 3.48$ $t_{\beta_3} = 3.48$	0.000 0.001 0.001	0.84	10.07	133.66	0.000
3	h,K,T	-4.739	0.058	6.797	2.265	$t_{\beta_0} = -8.45$ $t_{\beta_1} = 5.87$ $t_{\beta_2} = 3.31$ $t_{\beta_3} = 3.31$	0.000 0.000 0.001 0.001	0.90	5.93	162.74	0.000

El efecto de cambio por unidad en la transmisividad ( $\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$ ), el coeficiente de drenaje cambia entre 2.265 y 6.393  $\text{mm día}^{-1}$ . Los cambios menos sensibles se presentan para los índices de cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes (cm) donde por cada

unidad de cambio para esta variable el coeficiente de drenaje fluctúa entre 0.058 y 0.149 mm día<sup>-1</sup>. En el Cuadro 26 los coeficientes de regresión ( $\beta_2, \beta_3, \beta_1$ ) corresponden a valores de k, T y h respectivamente con respecto a (q).

Utilizando como herramienta el cuadrado medio del error (CME) para definir la precisión en el ajuste del modelo (Infante y Zárate, 1997), se encontró que el mejor modelo de regresión lineal ajustado es en donde interviene la conductividad hidráulica (K), ya que posee el valor más bajo (3.52); cabe citar también que al utilizar la transmisividad se observan valores bajos del CME, esto es debido a que esta característica edáfica está en función intrínseca con la conductividad hidráulica. Sin embargo, cuando en el modelo se utilizan las tres variables (h, K, y T) en forma conjunta el ajuste del modelo es considerado como aceptable (5.93).

Tomando como criterio el porcentaje que explica la funcionalidad del modelo matemático ( $R^2_{aj}$ ), podemos definir que los modelos lineales donde interviene la conductividad hidráulica son los que mejor se ajustan por poseer los valores más altos; por lo que el proceso de la mecánica de flujos en medios porosos (suelos de la Planicie Aluvial Tabasqueña), es explicado en un 90% cuando intervienen la carga hidráulica en el punto medio entre drenes (h), la conductividad hidráulica (K) y la transmisividad (T). La Figura 70 indica la relación entre valores observados y predictivos del modelo encontrado, en donde el coeficiente de drenaje es linealmente positivo.

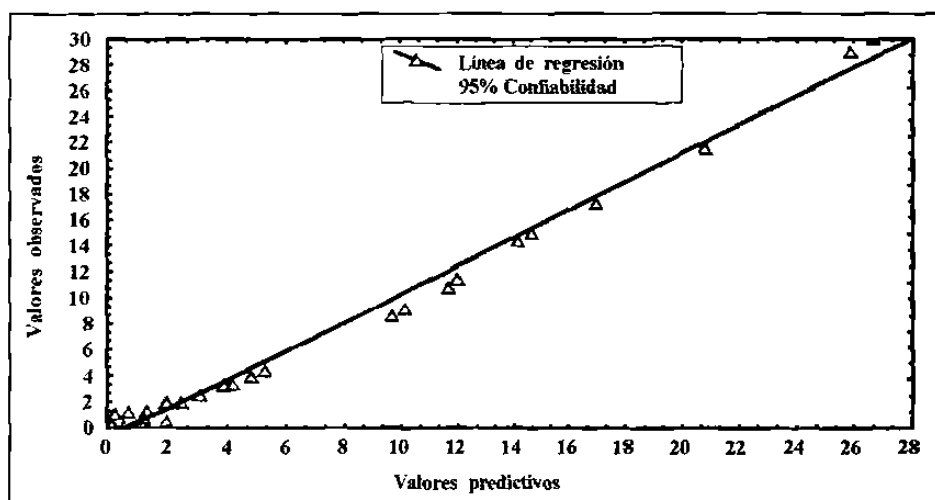


Figura 70. Relación existente entre los valores observados y predictivos ajustados por cuadrados mínimos utilizando coeficiente de drenaje como variable dependiente.

#### 4.3.1.2. Modelo lineal simple por efecto de espaciamiento sobre la fluctuación del manto freático

El análisis de regresión simple para explorar la relación funcional entre la variable espaciamiento entre drenes subterráneos ( $E$ ), sobre la variable carga hidráulica ( $h$ ) en el punto medio entre drenes para las condiciones de la Planicie Aluvial de Tabasco, demostró que existe un efecto importante del espaciamiento sobre la carga hidráulica. Los parámetros estimados ( $\beta_0$  y  $\beta_1$ ) del modelo fueron estadísticamente significativos mediante la prueba de  $t$ ; determinándose de esta manera que los coeficientes de regresión son diferentes de cero (Cuadro 27).

**Cuadro 27.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estandar, valores de  $t_{calculada}$  y niveles de significancia observados.

Coeficientes de regresión	Error estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada	Número Datos
$\beta_0 = 1.871897$	0.4912	3.81	0.0001	0.0977	255
$\beta_1 = 0.079172$	0.0148	5.33	0.0000		

El modelo matemático:

$$h = 1.871897 + 0.079172E \quad (36)$$

Explica la funcionalidad entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y el espaciamiento entre drenes subterráneos. La fracción de la varianza explicada indica que, solamente el 9.77% de la variabilidad de la fluctuación del manto freático en el punto medio entre drenes es explicada por el efecto del espaciamiento existente entre drenes subterráneos (de PVC, diámetro de 10 cm y filtro de poliéster), para las condiciones de los suelos de las series: Limón y Libertad de la Planicie Aluvial del Estado de Tabasco.

El análisis de varianza para el análisis de regresión, resultó altamente significativo lo que determinó que los coeficientes del modelo son diferentes de cero (Cuadro A4). La relación lineal estimada con el modelo de regresión entre la carga hidráulica y espaciamiento de drenes indicó que por cada incremento de 1 m lineal en el espaciamiento entre drenes, la carga hidráulica entre el punto medio entre drenes aumenta en 0.079 cm (Figura 71).



La precisión del ajuste del modelo considerándose en función del coeficiente de variación ( $c.v. = 0.829$ ) y varianza ( $s^2 = 12.362$ ) es adecuado, por lo que se confirma que el modelo de regresión guarda una relación funcional lineal y positiva.

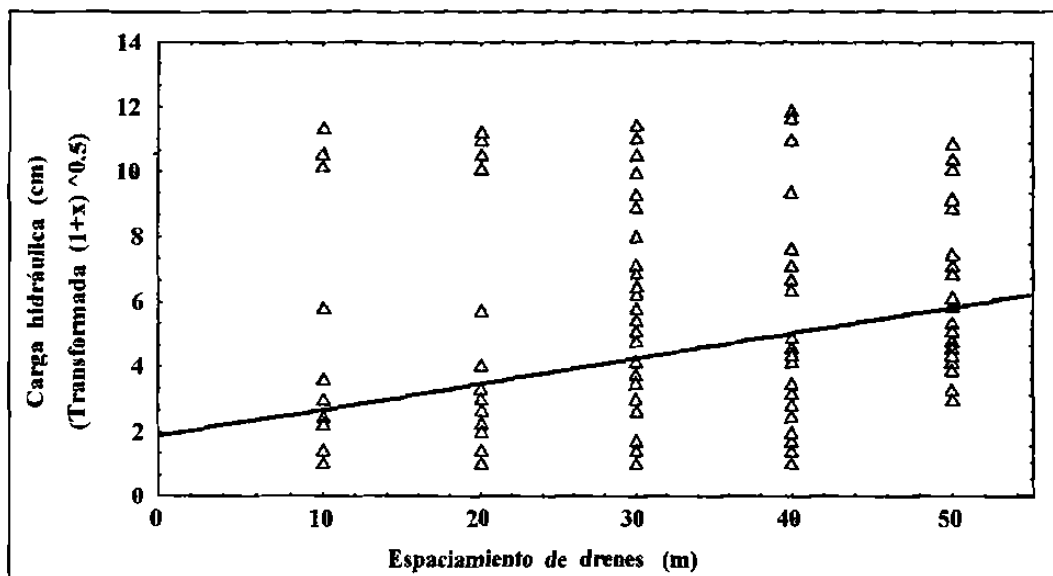


Figura 71. Comportamiento de respuesta del manto freático en el punto medio entre drenes en los diferentes espaciamientos de drenes.

Utilizando la carga hidráulica en el punto medio entre drenes, los espaciamientos como tratamientos y las observaciones diarias como repeticiones, el análisis de varianza del diseño completamente al azar mostró diferencia altamente significativa entre tratamientos a un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ) (Cuadro A5) por lo que la respuesta esperada de los niveles freáticos difieren significativamente con los espaciamientos de drenes subterráneos. La prueba de comparación de medias por el método de Tukey, determinó que los espaciamientos de drenes de 10, 20 y 40 m (ubicados en la Serie Libertad y Limón) se comportan de manera semejante, mientras que los espaciamientos de 30 y 50 m (ubicados en la Serie Libertad) también se comportan de forma similar en las fluctuaciones del nivel freático. Presentándose diferencias estadísticas significativas en el comportamiento de respuesta del manto freático en el punto medio entre drenes de los espaciamientos de 10, 20 y 40 m con respecto a los espaciamientos de 30 y 50 m (Cuadro A6).

### 4.3.1.3. Modelos para carga hidráulica en el punto medio entre drenes

Las estadísticas, análisis de regresión y análisis de varianza (Cuadros 28 y A7) identifican que solamente el coeficiente de drenaje ( $q$ ) actúa como factor principal para explicar la variación total de la carga hidráulica en el punto medio entre drenes, con un 62.25% (Cuadro 28). Por lo que, utilizando el análisis de regresión (Cuadro 29), en donde se considera sólo ( $q$ ) dio como resultado el modelo lineal:

$$h = 27.42055 + 4.40628q \quad (37)$$

el cual explica el 65.30% de la variación total de la fluctuación del manto freático en el punto medio entre drenes.

**Cuadro 28.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de  $t_{calculada}$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.

Coeficientes de regresión	Error estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada
$\beta_0 = -84.596$	104.206	-0.811	0.421	0.6225
$\beta_1 = 4.1306$	1.021	4.044	0.000	
$\beta_2 = 1.6786$	24.764	0.067	0.946	
$\beta_3 = 0.5596$	8.255	0.067	0.946	
$\beta_4 = -0.0572$	0.224	-0.254	0.800	
$\beta_5 = -1.3955$	1.698	-0.821	0.415	
$\beta_6 = -1.2869$	3.359	-0.383	0.703	
$\beta_7 = -0.8441$	6.036	-0.139	0.889	
$\beta_8 = -3.9529$	6.042	-0.654	0.516	
$\beta_9 = 0.4218$	6.524	1.597	0.117	

El análisis de regresión (Cuadro 29), considerando solamente  $q$  presentó alta significancia estadística observada ( $\alpha = 0.000$ ). Por consiguiente la carga hidráulica en el punto medio entre drenes ( $h$ ) en función del coeficiente de drenaje, dio como resultado el modelo lineal:

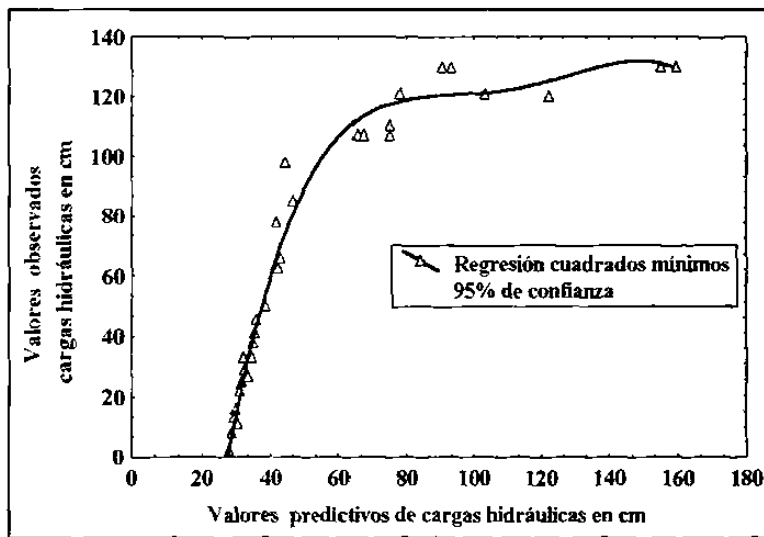
$$h = 27.42055 + 4.40628q \quad (38)$$

La prueba de sus coeficientes ( $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$ ) fueron diferentes de cero a un nivel de significancia del 0.01 (Cuadro 29); dicho modelo explicó el 65.3% de la variación total de la fluctuación del manto freático en el punto medio entre drenes.

**Cuadro 29.** Coeficientes de regresión del modelo con sus respectivos errores estándar, valores de  $t_{calculada}$ , niveles de significancia y la relación funcional del modelo.

Coefficientes de regresión	Error estándar	Valores de $t_{calculada}$	Nivel de significancia	$R^2$ ajustada
$\beta_0 = 27.42055$	4.381	6.257	0.000	0.6530
$\beta_1 = 4.40628$	0.451	9.751	0.000	

La Figura 72 muestra la relación existente entre valores predictivos y observados según el modelo lineal encontrado; en ella se aprecia que cuando los valores observados de carga hidráulica en el punto medio entre drenes fluctúa de 0 a 80 cm, los valores predictivos guardan una relación lineal funcional positiva; a valores mayores de 80 cm los valores predictivos presentan una tendencia diferente; esto es debido al estado de flujo hidráulico que prevalece en ese momento.



**Figura 72.** Relación existente entre los valores observados y predictivos ajustados por cuadrados mínimos utilizando carga hidráulica como variable dependiente.