

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. El procedimiento desarrollado comprendió las etapas siguientes:

Primera etapa.- Captura, depuración y análisis de las variables que definen patrones climatológicos, agrohidrológicos y edáficos de la Planicie Aluvial Tabasqueña (Región de la Chontalpa).

Segunda etapa.- Medición y evaluación de las variables climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos en el módulo de drenaje del campo experimental “El Trapecio”, Tabasco.

Tercera etapa.- Generar modelos de predicción para espaciamiento entre drenes subterráneos, carga hidráulica y coeficiente de drenaje.

3.2. Primera etapa.- **Captura, depuración y análisis de las variables que definen patrones climatológicos, agrohidrológicos y edáficos de la Planicie Aluvial Tabasqueña (Región de la Chontalpa)**

3.2.1. Localización geográfica

La Región de la Chontalpa se ubica en la parte occidental de la Planicie Aluvial Tabasqueña, en la Cuenca del Río Grijalva. Geográficamente se encuentra entre los paralelos 17° 22' y 18° 25' de latitud norte y entre los meridianos 93° 39' y 94° 06' de longitud oeste; con una altitud que varía de 0 a 50 msnm. Al norte limita con el Golfo de México, al sur con el Estado de Chiapas, al este con la Región Centro y al oeste el Estado de Veracruz. La superficie aproximada de dicha región es de 780,290 ha que representa el 31.50% del Estado de Tabasco y agrupa los municipios de Huimanguillo (1), Cárdenas (2), Nacajuca (3), Jalpa (4), Comalcalco (5), Cunduacán (6) y Paraíso (7) (Figura 4).

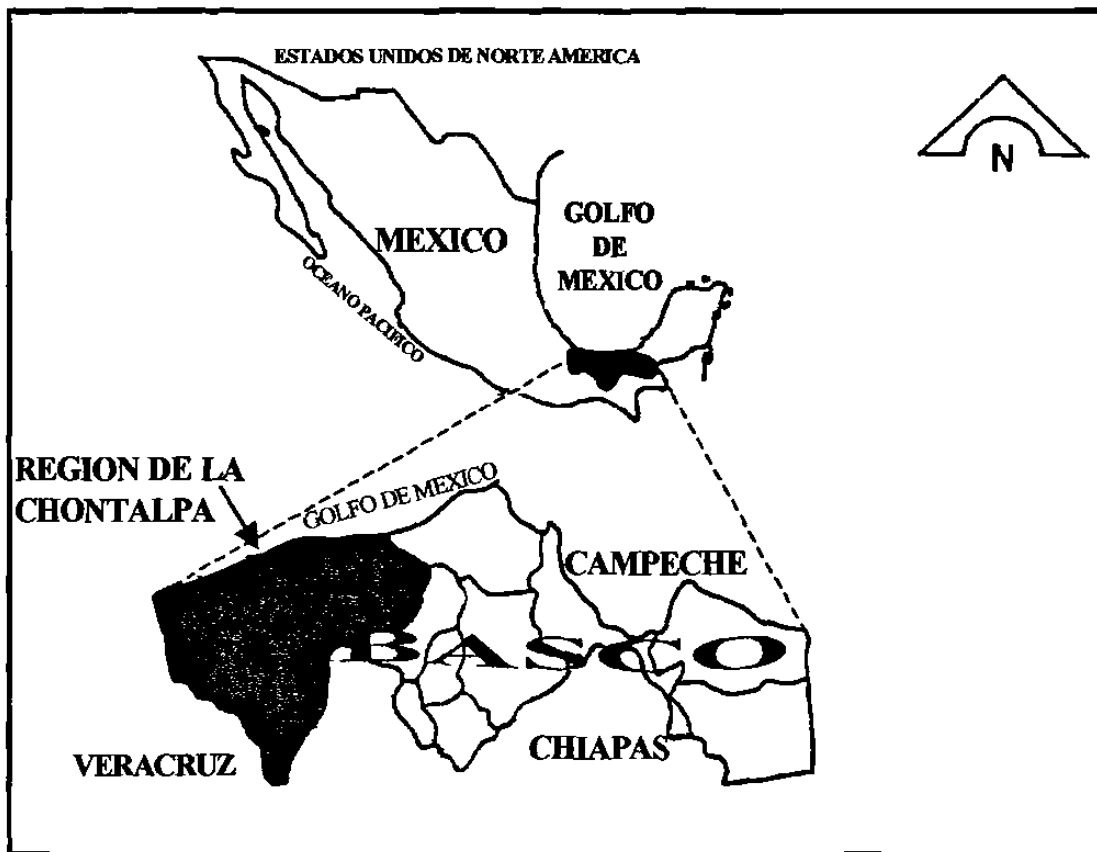


Figura 4. Localización de la Región de la Chontalpa, Tabasco.

3.2.2. Clima

En el área de estudio predomina el clima Am (f) w'' (i') g, según la carta climática de Köeppen modificada por García (1976).

- Am Cálido-húmedo con lluvias en verano, precipitación del mes más seco menor de 60 mm.
- (f) El % de lluvias invernales fluctúa en el rango de 5 a 10.2 con respecto a la precipitación anual.
- w'' Estación seca marcada en invierno y otra corta en verano (canícula).
- (i') Con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales entre 5 y 7 °C.
- g Mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano y de la temporada lluviosa.

La temperatura media anual de 26.7 °C, precipitación media anual de 2400 mm; la humedad relativa del aire fluctúa entre 68 y 98%; evaporación media anual de 1214 mm; vientos procedentes del norte, noreste y este con velocidades de 100 Km h⁻¹.

3.2.3. Geología

En la porción sureste de la República Mexicana, el marco tectónico regional está representado por los elementos: Placa de Norteamérica, Placa del Caribe, Placa de Cocos, Zona de Subducción y Falla de Montaguapolo chic. Dentro de este contexto geológico se encuentran las unidades tectónicas: Plataforma de Yucatán, Cuenca Salina del Istmo, Cuenca Macuspana-Campeche, Anticlinorium Sierra Madre, Sinclínorium Central de Chiapas, Macizo Sierra Madre del Sur, Macizo de San Andrés Tuxtla y Zona Metamórfica del Istmo. La Planicie Aluvial del Estado de Tabasco se ubica dentro de la Cuenca Salina del Istmo (CNA 1991).

3.2.4. Geomorfología

Geomorfológicamente, la provincia geológica de la Cuenca Salina del Istmo presenta dos grandes geoformas: La Planicie Aluvial y los Lomeríos o Terrazas Aluviales del Pleistoceno. La primera está caracterizada por extensas llanuras de inundación con poca o nula pendiente, formada por depósitos de ríos en diferentes medios (lacustres, palustres y litoral); en la segunda topoforma, la erosión hídrica ha provocado que estas Terrazas Aluviales se disecten y formen una serie de lomeríos de baja altura.

3.2.5. Fisiografía

Fisiográficamente, la Planicie Aluvial Tabasqueña se localiza en la provincia fisiográfica XIII denominada Llanura Costera del Golfo Sur; Subprovincia Llanura y Pantanos Tabasqueños la cual comprende el 95.57% de la superficie del Estado de Tabasco. Está constituida por una topografía plana de poco gradiente hacia el mar. Hacia

el sur, la fisiografía está formada por extensos lomeríos con alturas máximas de 50 msnm, los cuáles desaparecen bruscamente para dar lugar a la parte frontal de la Sierra Madre de Chiapas, en cuyas montañas (altitudes de 200 a 2500 msnm) nacen las principales corrientes fluviales que surcan la Planicie Aluvial de Tabasco.

West *et al.* (1976) estudiaron y clasificaron al Estado de Tabasco en cuatro regiones fisiográficas según el paisaje o geoforma presente: 1) Plegamientos de Rocas Sedimentarias, 2) Terrazas Aluviales del Pleistoceno, 3) Planicie Aluvial del Reciente y 4) Bordos de Playas. Palma y Cisneros (1996) regionalizaron en siete zonas fisiográficas de acuerdo a diferentes ambientes agrícolas, utilizando el método de zonificación fisiográfico para generar cartografía: 1) Zona de la Sierra, 2) Zona Calcárea, 3) Zona de Lomeríos, 4) Llanura Aluvial, 5) Vega de Río, 6) Llanura de Inundación y 7) Zona de Costa (Figura 5).

Las principales zonas fisiográficas que abarcan a la Región de la Chontalpa son las siguientes: Llanura de Inundación (241,470 ha), Llanura Aluvial (116,714 ha), y Lomeríos (188,192 ha).

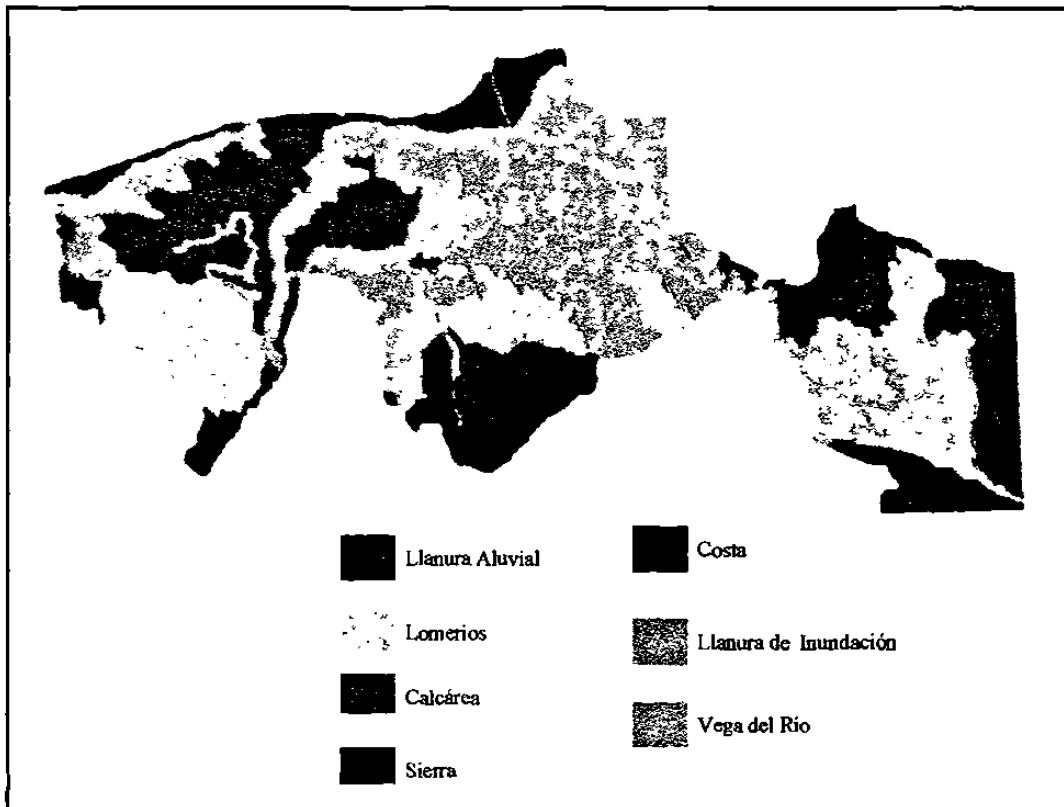


Figura 5. Zonas fisiográficas del Estado de Tabasco (Palma y Cisneros, 1996).

3.2.6. Suelos

Según West *et al.* (1976); el proceso de formación de los suelos de la región, tiene por origen la erosión, acarreo y sedimentación de materiales procedentes de la cuenca alta del Río Grijalva, al pasar por la Sierra Central, Norte de Chiapas, por las Terrazas del Pleistoceno y del Reciente localizadas al sur de Tabasco. En base a la clasificación taxonómica de los suelos de Tabasco (Palma y Cisneros, 1996) y de acuerdo a la leyenda corregida de los suelos del mundo (FAO, 1989), en la Región de la Chontalpa se determinaron 11 unidades y 19 subunidades de suelos, que se presentan en el Cuadro 1 y Figura 6. La unidad de suelo que predomina son los Vertisoles (VR) y dentro de esta unidad se detectó una subunidad que se denomina Vertisol éutrico (VRe), los cuales abarcan aproximadamente una superficie de 263,650 ha que representan el 33.79% de la superficie total de la Región de la Chontalpa (780,290 ha). Fisiográficamente dichos suelos se localizan en planicies con ligera inclinación, Sin embargo, los Vertisoles localizados en la sierra presentan relieves ondulados con pendientes mayores del 15%. El material parental esta constituido en la mayor parte de los casos por sedimentos aluviales recientes. Los Vertisoles ubicados en los extremos sur y este del Estado de Tabasco se originan directamente a partir de rocas sedimentarias de terciarios, principalmente calizas y lutitas.

Los Vertisoles son suelos de alta fertilidad natural, cuya profundidad varía de 60 a más de 200 cm de textura arcillosa del tipo montmorillonítica, el coeficiente de expansión de esta arcilla es del 22%, pH desde ligeramente ácido hasta ligeramente neutro y normalmente presentan solamente horizontes A y C que se diferencian por el grado de agregación. Tienen un porcentaje de saturación de bases del 50% o más, al menos entre 20 y 50 cm de profundidad; no presentan horizonte cálcico o gypico. Los Vertisoles peli-éutricos (VRep) son la misma subunidad de suelo, subdividida a tercer nivel por la presencia de chromas menores que 1.5, es decir se trata de suelos más oscuros que los Vertisoles éutricos. Las características principales de los Vertisoles de estas áreas son los procesos de expansión y contracción provocando que en los primeros 80 cm de profundidad sufra un fenómeno de inversión de suelo, por lo que los primeros horizontes se encuentran muy mezclados. Los principales factores de demérito de estos suelos están ligados a sus características físicas (gran cantidad de arcillas expandibles,

permeabilidad lenta, drenaje deficiente, manto freático elevado) y en algunos a su topografía más que a las de fertilidad. El uso actual de estos suelos, principalmente es: Caña de azúcar, cacao, praderas extensivas, arroz y maíz.

En el Estado de Tabasco los Vertisoles se localizan en los municipios siguientes: Huimanguillo, Cárdenas, Cunduacán, Comalcalco, Jalpa de Méndez, Nacajuca, Teapa, Tacotalpa, Jalapa, Macuspana, Jonuta, Balancán y Tenosique, abarcando una superficie de 492,502.2 ha que representa el 19.9% de la superficie total del estado.

Cuadro 1. Clasificación de los suelos de la Región de la Chontalpa en base a la leyenda FAO, 1989.

UNIDAD	SUBUNIDAD	SIMBOLO	SUPERFICIE (hectáreas)	PORCENTAJE (%)
Histosoles (HS) (27,100 ha)	Histosoles fibricos		27,100	3.47
Luvisoles (LV) (15,240 ha)	Luvisoles crómicos		15,240	1.95
Acrisoles (AC) (114,282 ha)	Acrisoles ferricos		41,650	5.34
	Acrisoles gléyicos		4,947	0.63
	Acrisoles húmicos		8,575	1.10
	Acrisoles plinticos		59,110	7.58
Fluvisoles (FL) (123,282 ha)	Fluvisoles éútricos		109,645	14.05
	Fluvisoles gleyi-éútricos		13,633	1.75
Cambisoles (CM) (9,838 ha)	Cambisoles vérticos		4,640	0.60
	Cambisoles éútricos		2,725	0.35
	Cambisoles gléyicos		2,473	0.32
Gleysoles (GL) (89,854 ha)	Gleysoles éútricos		7,870	1.0
	Gleysoles mólicos		81,984	10.51
Solonchaks (SC) (24,730 ha)	Solonchaks gléyicos		24,730	3.17
Plintsoles (PT) (28,370 ha)	Plintsoles dístricos		28,370	3.64
Arenosoles (AR) (15,133 ha)	Arenosoles háplicos		15,133	1.94
Vertisoles (VR) (263,650 ha)	Vertisoles éútricos		263,650	33.79
Leptosoles réndzicos + Vertisoles éútricos			24,625	3.15
Cuerpos de agua			44,190	5.66
TOTAL			780,290	100.00

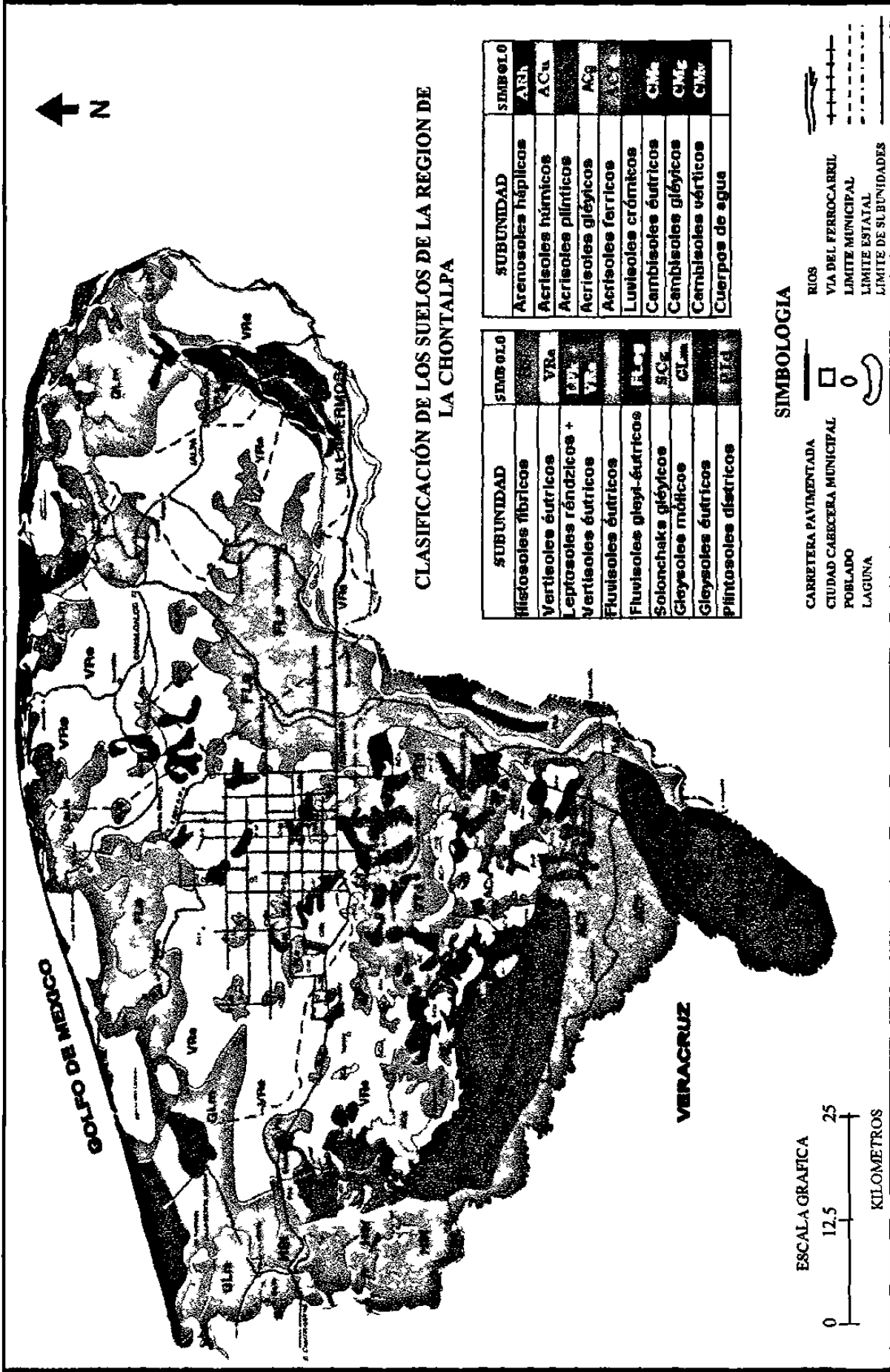


FIGURA 6. Plano de suelos de la región de la Chontalpa en base a la leyenda FAO-UNESCO (adaptado y modificado después de Palma y Cisneros, 1996).

3.2.7. Hidrología

Las principales cuencas hidrológicas en la región son: Río Grijalva–Villahermosa que abarca el 41.45% de la superficie del Estado, Río Usumacinta con un 29.24%, Río Tonalá, Lagunas del Carmen y Machona el 24.78%; y la Laguna de Términos el 4.53%.

La Región de la Chontalpa se localiza entre los ríos Grijalva y Tonalá al este y oeste respectivamente (Figura 7). Los principales ríos que cruzan o bordean el área del Plan Chontalpa son: Santa Ana que corre hacia el noroeste y desemboca en la Laguna Machona, los ríos Naranjeño y su afluente San Felipe desembocan en la Laguna del Carmen, el río Zanapa recibe las aguas del río Coatajapán y de la Laguna del Rosario descargando en el río Tonalá. Estos ríos reciben las aguas del sistema de drenaje del Plan Chontalpa.

Los acuíferos principales de la región están constituidos en las siguientes unidades litológicas: Aluvial Reciente de muy poco espesor y las formaciones del Mioceno (Terciario), esta última llega a alcanzar espesor hasta de 1500 m; sin embargo, hasta los 690 m es ocupado por acuíferos de agua dulce, en tanto que a mayor profundidad se manifiesta presencia de aguas salobres o saladas.

El flujo general del agua subterránea es en dirección sur-norte, descargando finalmente en el Golfo de México. La recarga de los acuíferos profundos provienen del sur, desde las estribaciones de la Sierra Madre de Chiapas, teniendo ligeras desviaciones en su trayectoria general, inducidas por su naturaleza geológica y por sobre-explotación local de los acuíferos en sitios concentrados de pozos petroleros (PEMEX, 1979).

3.2.8. Variables evaluadas: Climatológicas, agrohidrológicas y edáficas

3.2.8.1. Variables climatológicas: Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso, precipitación y evaporación media mensual y lluvia de diseño.

3.2.8.1.1 Promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso

La red de estaciones meteorológicas del Estado de Tabasco tiene un total de 92 estaciones de las cuales se seleccionaron 86 por tener representatividad en forma objetiva satisfaciendo los requisitos de longitud y homogeneidad de la serie climática. Para el

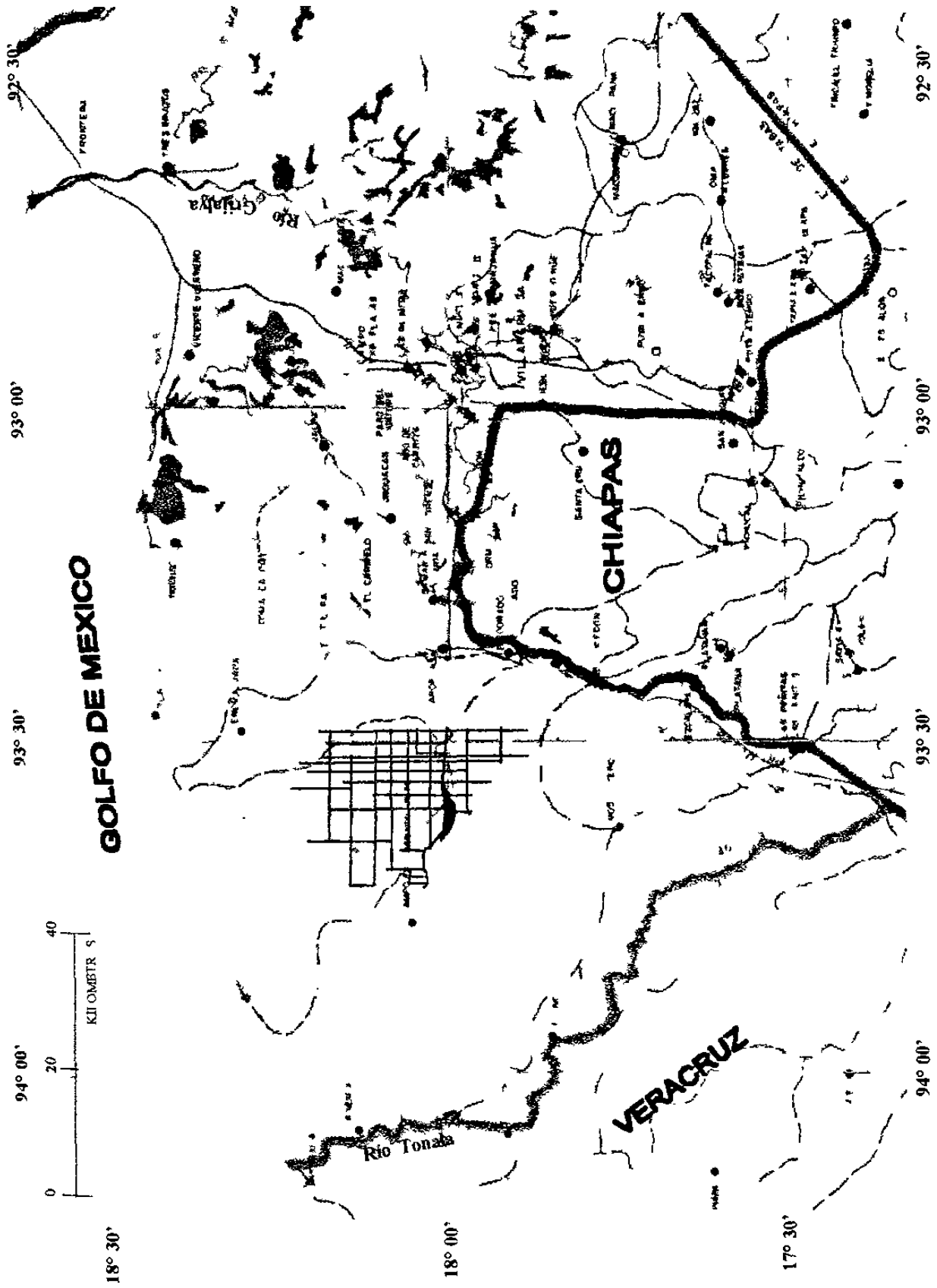


Figura 7. Plano hidrológico de la Región de la Chontalpa, Tabasco.

promedio de lluvias del mes más lluvioso se realizaron análisis de distribuciones de probabilidad mediante el método de momentos, la bondad de ajuste fue probada con ji-cuadrada, con el programa computacional “Frecuen” realizado para este fin, planteándose para la prueba la hipótesis siguiente: La distribución de probabilidad propuesta ajusta adecuadamente las observaciones. Fue calculado el promedio de lluvias diarias del mes más lluvioso por los métodos de isoyetas y media aritmética. Se aplicó la técnica de ordenación o agrupamiento a las estaciones meteorológicas, según la característica de distribución espacial y variabilidad de lluvias diarias del mes más lluvioso, utilizando análisis multivariado por el método conglomerado; tomándose distancias euclidianas como: índice de distancia métrica o de similitud (Jhonson y Wichern, 1988). Técnicas de interpolación Kriging fueron utilizadas para definir la configuración espacial temporal de la lluvia promedio diaria del mes más lluvioso; se utilizó el programa de computación Surfer.

3.2.8.1.2. Precipitación y evaporación media mensual

Estas variables se evaluaron en las 86 estaciones meteorológicas, permitiendo relacionarlas a través del tiempo. Para la determinación del período crítico de exceso de lluvia, se construyeron climogramas de Gausen para dos estaciones representativas: una de la Planicie Aluvial Tabasqueña y otra de la región orográfica de la Sierra de Chiapas. Se analizaron los datos con el paquete computacional “Sistema de Información para Caracterizaciones Agroclimáticas” (SICA) (Medina y Ruiz, 1992).

3.2.8.1.3. Lluvia de diseño

Las decisiones estratégicas en la planeación y operación de sistemas de producción agrícola conlleva a definir el valor de precipitación que involucra la relación entre la intensidad, duración y frecuencia. Para la variable lluvia de diseño se tomaron los valores promedios de lluvias diarias del mes más lluvioso en las cuales se definió el valor de precipitación que involucra la relación entre intensidad, duración y frecuencia. Utilizándose el parámetro anteriormente calculado se efectuó un análisis de frecuencias para distribuciones de probabilidad de lluvia puntual y distribución de probabilidad espacial, lo

que permitió relacionar lámina, duración, frecuencia y lluvia de diseño, según metodología propuesta por Chow et al. (1994), se utilizó el programa computacional “Retorno” creado para analizar frecuencias para distribuciones de probabilidad de lluvia y calcular períodos de retorno en días y años. Este valor de precipitación fue definido con la selección del nivel de probabilidad que expresa el riesgo que se considera aceptable para el sistema hidráulico de un sistema de drenaje. Se digitalizaron mapas con láminas de lluvias esperadas para la Planicie Aluvial y se regionalizó según el valor obtenido por el modelo:

$$LLD\tilde{N}O = \bar{X} + K_t \hat{S} \quad (19)$$

donde:

$$K_t = \left[0.5772 + l_n \left(l_n \frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (20)$$

donde:

LLD \tilde{N} O = lluvia de diseño.

\bar{X} = media poblacional.

K_t = factor de corrección.

\hat{S} = desviación estándar.

l_n = logaritmo natural.

T tiempo de retorno en años.

3.2.8.2. Variables agrohidrológicas: Profundidad del manto freático con respecto al nivel del terreno.

Tomando como base la topografía y el período crítico de excesos de lluvias, se localizó la distribución espacial de 998 pozos de observación del manto freático, con los cuáles se desarrollaron mapas, trazando las líneas que unen puntos de igual cota y de profundidad del manto freático. El análisis de los datos de campo de las elevaciones del terreno y el nivel freático, permitieron desarrollar mapas digitalizados de isobatas, los

cuáles definieron la configuración de la superficie freática, dirección e intensidad del flujo subsuperficial. Para la estimación de la distribución espacial del manto freático se realizó con el método de interpolación Kriging.

3.2.8.3. Variables edáficas: Espesor de horizontes genéticos, % de arcilla, % limo, % arena, pH, % de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, calcio, magnesio, sodio, potasio, fósforo asimilable, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y humedad aprovechable.

Se compiló información de estudios de suelos realizados en el Estado de Tabasco (CETENAL, 1976; Dirección de Agrología, 1972; Subdirección de Agrología, 1978; 1980; SARH, 1972a; 1972b; 1976a; 1976b; 1976c; 1979; 1980a; 1980b; 1981a; 1981b; 1981c; 1982a; 1982b; 1984a; 1984b; 1987a; 1987b) estructurándose una base de datos integrada por 91 perfiles de suelos con sus respectivas características físicas y químicas por horizonte genético de diagnóstico. Se aplicó un análisis multivariado por el método de componentes principales para seleccionar las variables que mayor explicación estadística ($r > 0.7$) dan a la variabilidad total. Con los datos originales se realizó la clasificación geohídrica con técnicas multivariadas por el método conglomerado y coeficientes de correlación de Pearson como índice de distancia métrica.

3.3. Segunda etapa.- Medición y evaluación de las variables climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos en el módulo de drenaje del campo experimental “El Trapecio”, Tabasco

3.3.1. Localización del campo experimental

El campo experimental “El Trapecio”, perteneciente al CEICADES (Centro de Enseñanza, Capacitación e Investigación para el Desarrollo Agropecuario, Forestal y Acuícola del Sureste), está ubicado en la Región Chontalpa y es un área representativa de la Planicie Aluvial del Estado de Tabasco; localizada en los 17° 49' 03" de latitud norte y 93° 23' 03" de longitud oeste y a 11 msnm (Figura 8).

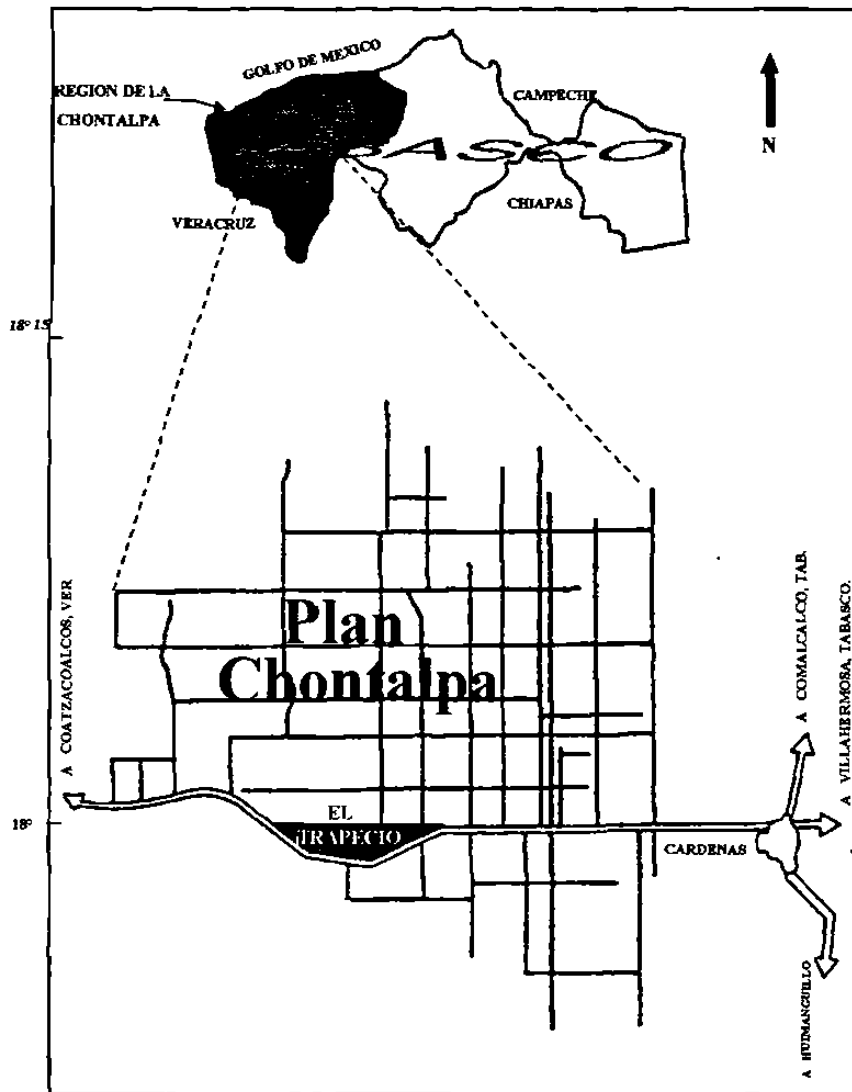


Figura 8. Localización del campo experimental “El Trapecio”, Región de la Chontalpa.

3.3.2. Suelos

El campo “El Trapecio” presenta 5 series de suelos (Figura 9) localizándose el 79% de la superficie del módulo de drenaje en la Serie Limón y el 21% en la Serie Libertad.

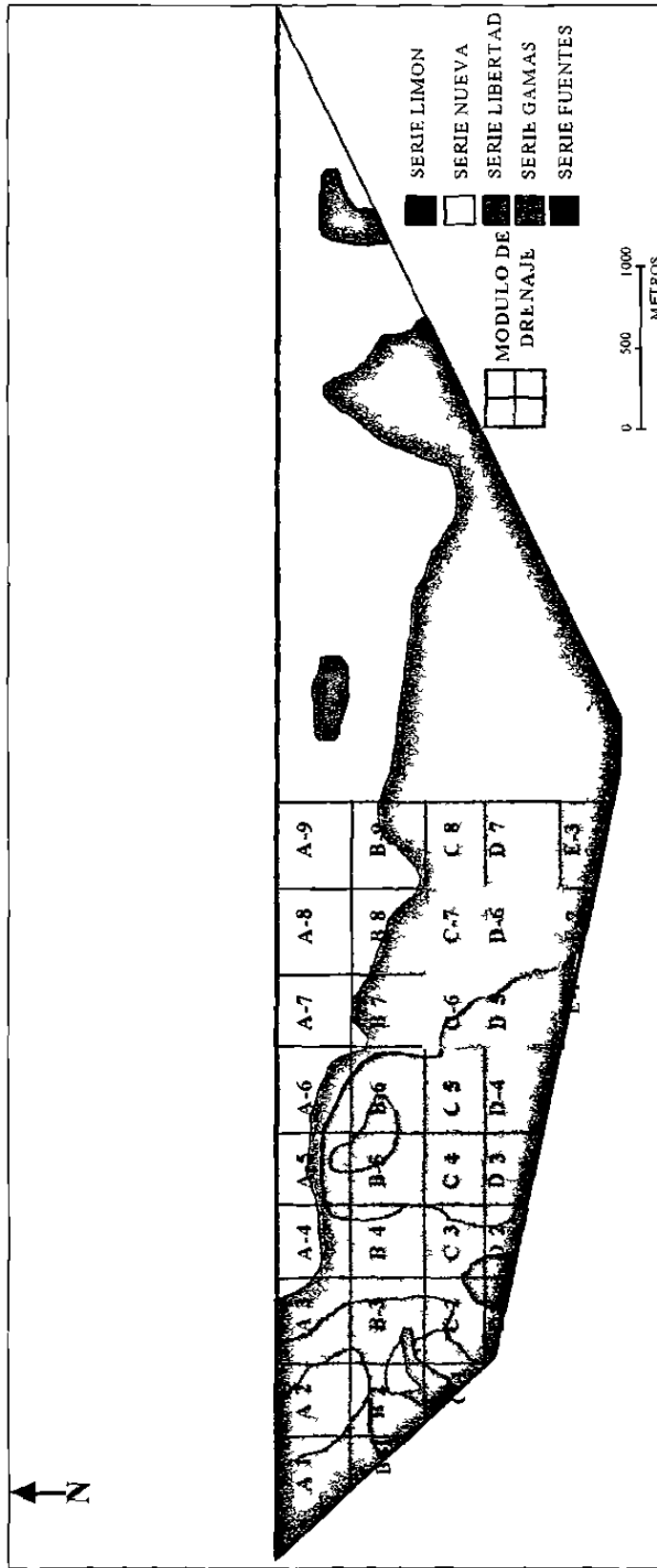


Figura 9. Mapa de series de suelos del campo experimental "El Trapecio" y localización del módulo de drenaje (Adaptado después de Trujillo y Palma 1988).

Los suelos de la Serie Limón son de formación aluvial y se han originado por el acarreo y depósito de materiales con productos sedimentarios y graníticos provenientes de las formaciones geológicas ocurridas en el Pleistoceno y el Reciente, entre sus componentes más importantes están las lutitas y margas que contienen materiales arcillosos con porcentajes variables de material cementante. Los suelos son de textura arcillosa del tipo montmorillonítica. Según la clasificación taxonómica de suelos en base a la leyenda corregida de los suelos del mundo (FAO, 1989), pertenecen a la subunidad de los Vertisoles éútricos.

En la Figura 10 se presenta un perfil representativo de la Serie Limón. Los suelos de la Serie Libertad son de origen aluvial del Reciente, profundos y generalmente presentan horizontes A1, C y IIC. Son de textura franco-arcillosa en los primeros estratos y cambia a texturas medias a partir de los 50 cm, de color pardo-amarillento, café grisáceo con motas amarillentas. Su estructura es de gránulos a bloques angulares o subangulares, su consistencia es de plástica a muy plástica con abundantes poros finos y medianos. El pH varía de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. El drenaje interno de este suelo es de moderado a lento.

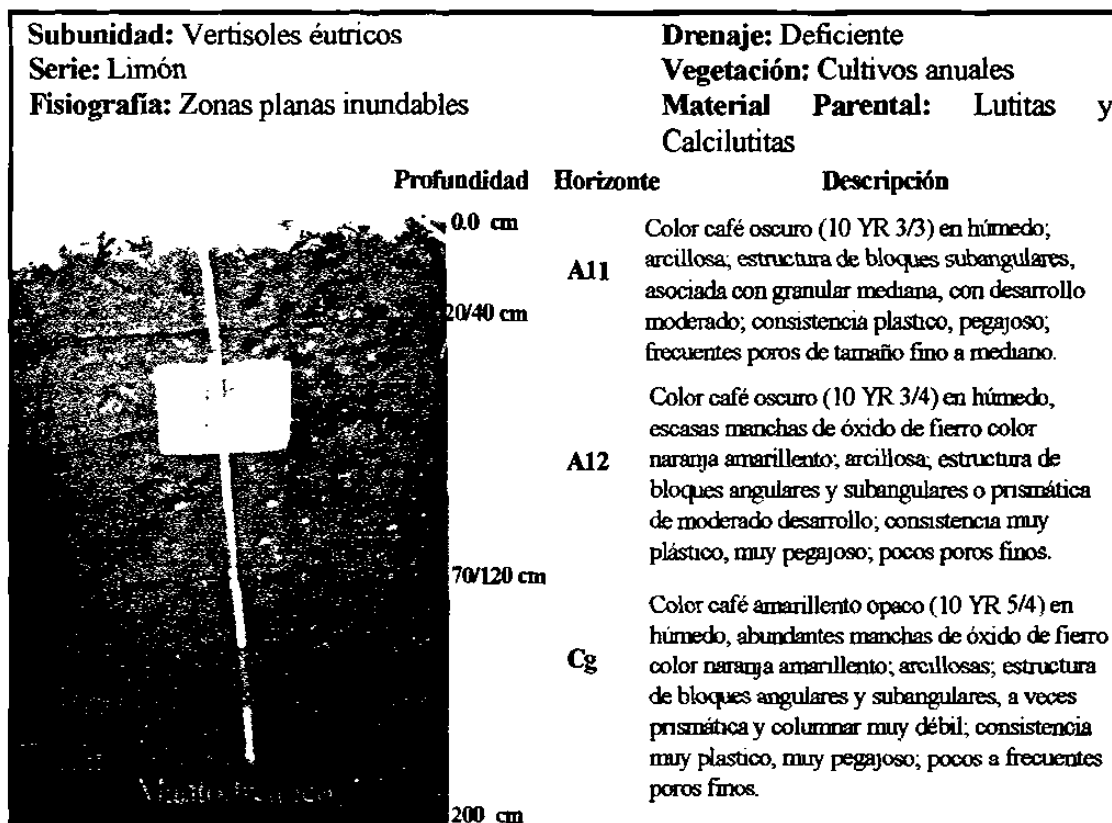


Figura 10. Perfil representativo de la Serie Limón.

3.3.3. Localización y construcción del módulo de drenaje

El campo experimental “El Trapecio” comprende una superficie de 1200 ha de las cuáles 60 ha corresponden al módulo de drenaje subsuperficial localizado en los lotes C-6, C-7, D-5, y D-6, cuyas dimensiones son de 450 m de largo y 350 m de ancho con una superficie de 15 ha por lote (Figura 9). En cada lote se ubicó una serie de drenes entubados de 10 cm de diámetro, la tubería es de cloruro de polivinilo (PVC) corrugada y perforada, utilizando poliéster como filtro; con espaciamientos de 10, 20, 30, 40 y 50 m. La profundidad promedio de los drenes varió según el relieve del suelo entre 1.1 y 1.4 m, y la pendiente entre 0.01 a 0.02 %. Cada espaciamiento (tratamiento) está conectado a un colector de tubería de plástico corrugada sin perforar de 20 cm de diámetro que descarga a una estructura de control (aforador) que permite medir los volúmenes de agua por tratamiento en tiempo y espacio a considerar. Cada tratamiento tiene 3 repeticiones. Una modificación realizada al espaciamiento de 30 m (tratamiento), fue la utilización de filtro a los drenes interceptores, utilizándose arena y grava para ensayar su comportamiento sobre la captación y remoción de los excesos de agua. Las estructuras de control son básicamente una construcción cuadrada de concreto con dimensiones de 1.2 m de lado y 1.7 m de profundidad con respecto al nivel del suelo; ésta recibe el caudal del colector de cada serie de interceptores (tratamientos) y además cuenta con la salida final hacia el colector abierto (dren abierto). El diseño principal de la estructura de control tiene una pared intermedia entre la entrada de agua y la salida hacia el colector tipo abierto; esta pared intermedia cuenta con 3 compuertas a diferente altura; que permiten las operaciones de controlar el nivel freático (CEICADES, 1993).

3.3.3.1. Distribución de los tratamientos en el módulo de drenaje

Los cuatro lotes (C-6, C-7, D-5, y D-6) en que fueron divididas las 60 ha del módulo de drenaje tienen la distribución siguiente:

Lote C-6.- Se localiza en la parte noroccidental del módulo de drenaje, el 65% (9.75 ha) de su superficie se encuentra en la serie de suelos Limón y el 35% (5.25 ha) en la serie

Libertad (Figura 9). Cuenta con cuatro líneas de drenes interceptores (Figura 11), distribuidas de la siguiente forma:

- a) 4 líneas con espaciamiento de 30 m entre línea (Cultivo: Caña de azúcar).

La longitud de las líneas de drenes interceptores es de 150 m cada una, dando un total de 600 m; la tubería es corrugada. Cuenta con un total de 90 m de colectores de 20 cm de diámetro. Tiene una estructura de control. En particular en este tratamiento las zanjas de los drenes interceptores fueron rellenadas con arena como una variante para observar el efecto de filtro.

Lote C-7.- Se localiza en la parte nororiental del módulo, y el 100% de su superficie se localiza dentro de la serie Limón (Figura 9), cuenta con 15 líneas de drenes interceptores de 200 m de longitud en la parte oriental y 8 líneas de 225 m de longitud en la parte occidental (Figura 12), distribuidas de la siguiente forma:

- a) 5 líneas con espaciamiento de 10 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- b) 5 líneas con espaciamiento de 20 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- c) 5 líneas con espaciamiento de 35 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- d) 4 líneas con espaciamiento de 30 m entre línea (Cultivo: Maíz).
- e) 4 líneas con espaciamiento de 50 m entre línea (Cultivo: Maíz).

Se cuenta con un total de 580 m de colectores para los diferentes espaciamientos de drenaje, incluyendo 80 m para atravesar el camino localizado en la parte occidental del lote, ya que los drenes de esta porción descargan hacia el colector abierto localizado entre los lotes C-6 y C-7. Se usó tubería corrugada sin ranurar y sin filtro y de 20 cm de diámetro. El lote cuenta además con 5 estructuras de control, una para las repeticiones de cada espaciamiento.

Lote D-5.- Se localiza en la parte suroccidental del módulo, el 73% (11 ha) de su superficie se encuentra en la serie de suelos Libertad y el 27% (4 ha) en la serie Limón (Figura 9); los

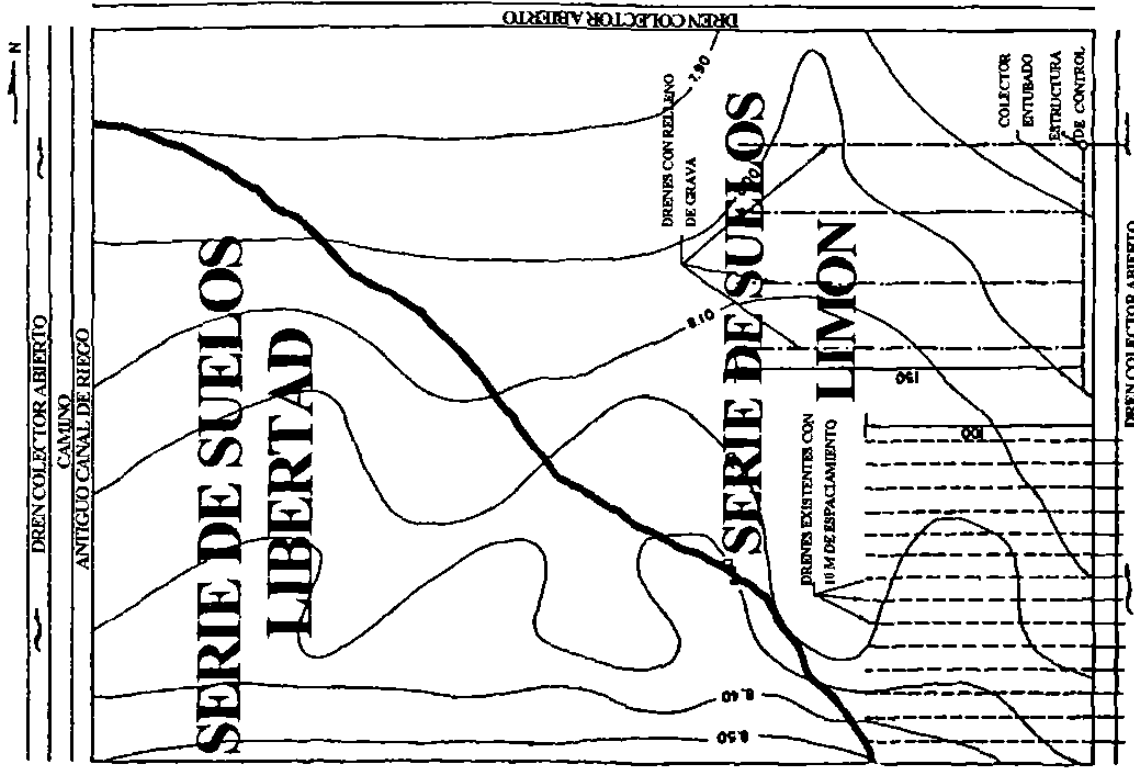


Figura 11. Localización y distribución de los drenes. Lote C-6

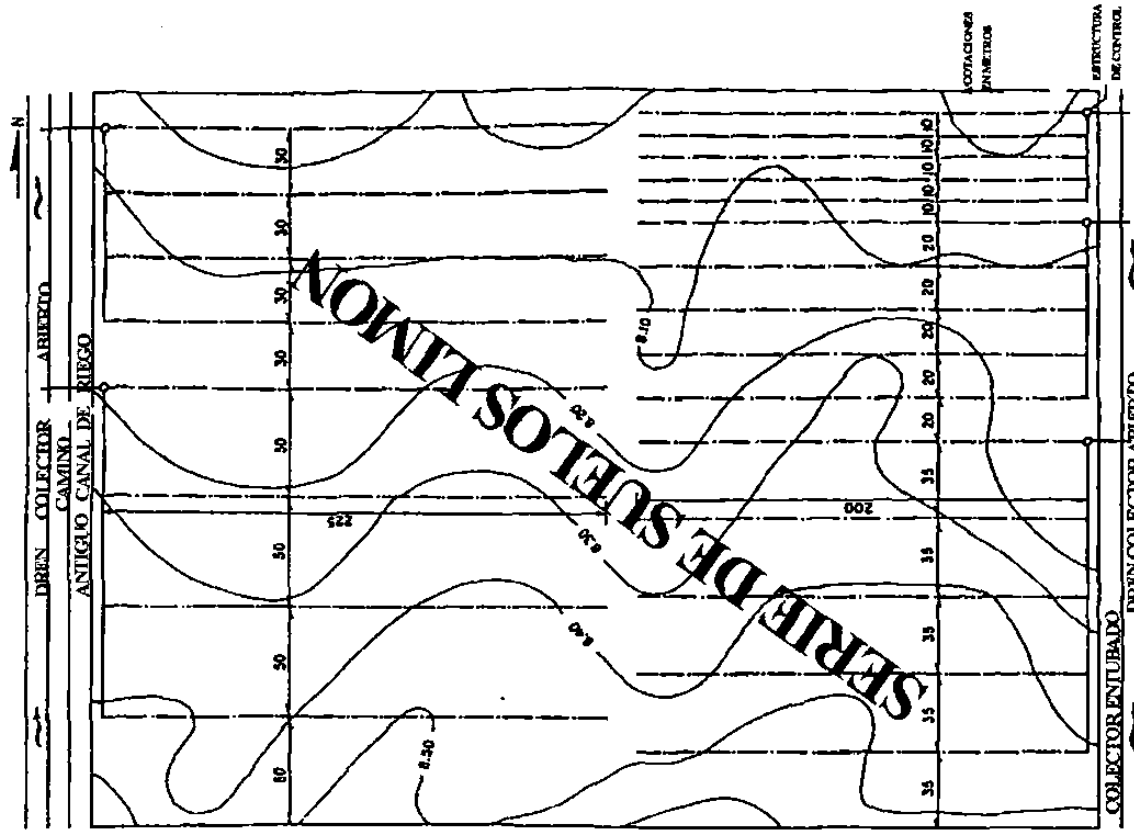


Figura 12. Localización y distribución de los drenes. Lote C-7

espaciamientos y repeticiones de 10, 20, y 40 m se localizan en la parte oriental del módulo y los de 30 y 50 m en la parte occidental del mismo (Figura 13). Este lote cuenta con un total de 19 líneas de drenes interceptores, distribuidas de la siguiente forma:

- a) 4 líneas con espaciamento de 10 m entre línea (Sin cultivo).
- b) 4 líneas con espaciamento de 20 m entre línea (Sin cultivo).
- c) 3 líneas con espaciamento de 30 m entre línea (Sin cultivo).
- d) 4 líneas con espaciamento de 40 m entre línea (Sin cultivo).
- e) 4 líneas con espaciamento de 50 m entre línea (Sin cultivo).

La longitud de las líneas de drenes interceptores es de 200 m cada una, el diámetro de la tubería es de 10 cm, siendo tubería corrugada ranurada y con filtro de poliéster. Se cuenta con un total de 490 m de colectores para los diferentes espaciamentos de drenaje, incluyendo 70 m de colectores utilizados para atravesar el camino de la parte occidental del lote. Se usó tubería corrugada sin ranurar, sin filtro y de 20 cm de diámetro. El lote cuenta además con 5 estructuras de control, una para las repeticiones de cada espaciamento.

Lote D-6.- Se localiza en la parte suroriental del módulo de drenaje, y el 100% de su superficie se encuentra en la serie de suelos Limón (Figura 9). Tiene en total 7 líneas de drenes interceptores (Figura 14), distribuidas de la siguiente forma:

- a) 3 líneas con espaciamento de 40 m entre línea (Cultivo: Caña de azúcar).
- b) 4 líneas con espaciamento de 30 m entre línea (Cultivo: Maíz).

La longitud de las líneas de drenes interceptores es de 250 m cada una, el diámetro de la tubería es de 10 cm de plástico corrugada, ranurada y con filtro de poliéster. Se cuenta con un total de 170 m de drenes colectores de tubería corrugada sin ranurar y sin filtro de 20 cm de diámetro. El lote cuenta además con 2 estructuras de control, una para las repeticiones de cada espaciamento.

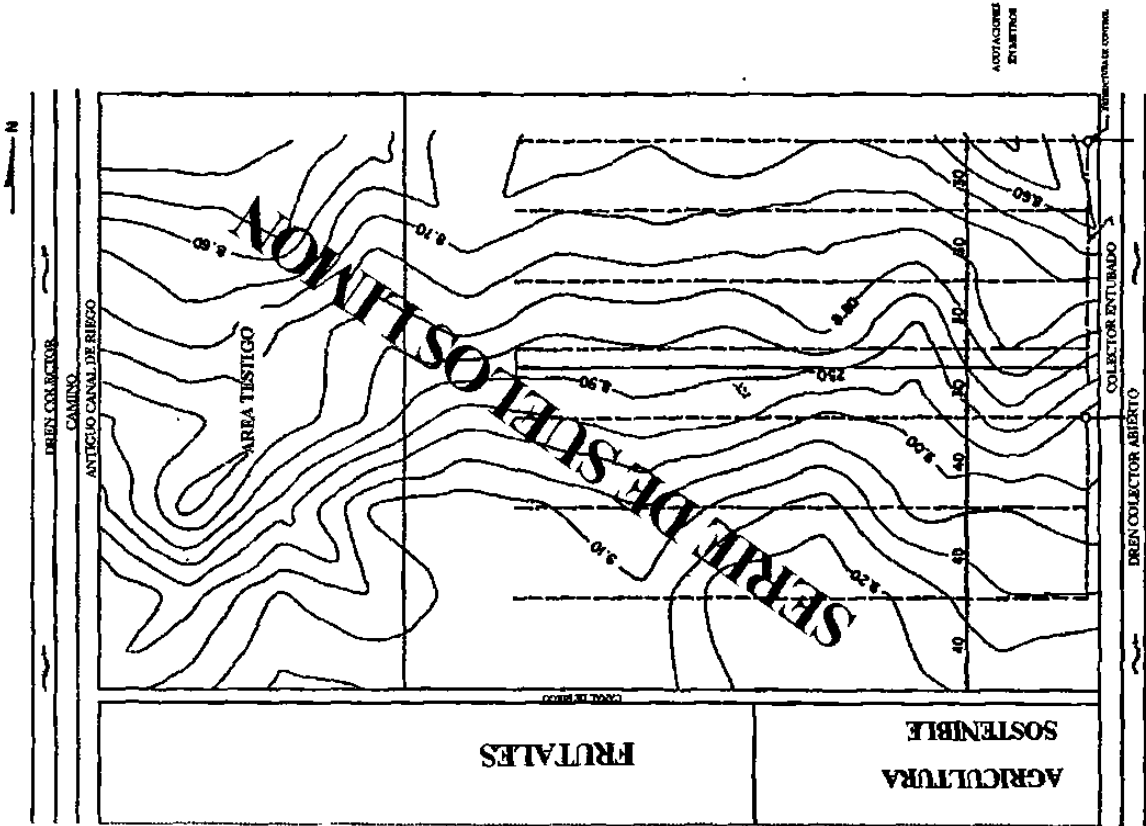


Figura 13. Localización y distribución de los drenes. Lote D-5

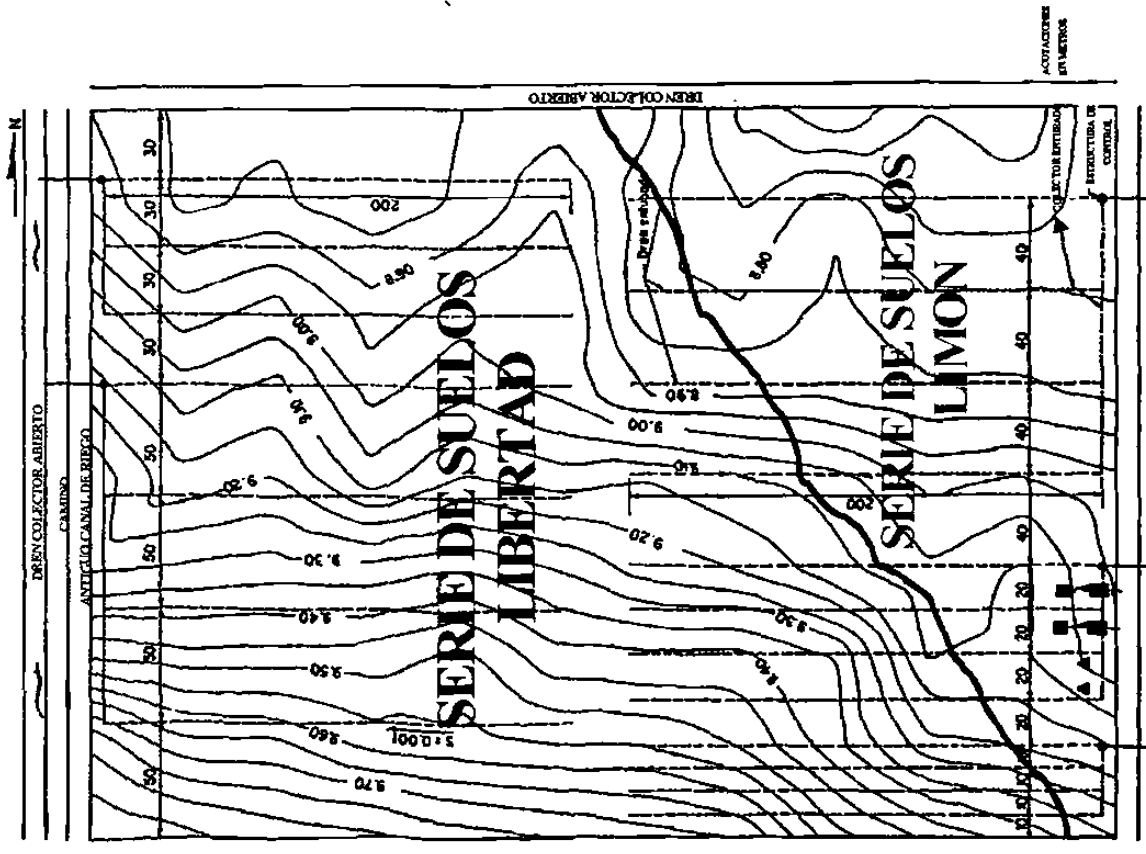


Figura 14. Localización y distribución de los drenes. Lote D-6

3.3.4. Variables evaluadas: Climatológicas, agrohidrológicas, edáficas y cultivos

3.3.4.1. Variables climatológicas: Precipitación pluvial diaria, evaporación diaria, temperatura ambiental mínima, media y máxima diaria y temperatura del suelo a 0,10,20 y 50 cm.

Los datos de las variables climatológicas fueron tomados de la estación meteorológica que se encuentra ubicada a 300 m del módulo de drenaje subterráneo, dentro del campo experimental “El Trapecio”. Estas variables fueron analizadas en forma conjunta con las variables agrohidrológicas para seleccionar aquellas que estadísticamente fueran representativas del funcionamiento del sistema de drenaje subterráneo. Se utilizó el análisis de regresión múltiple y simple para modelar el sistema de manejo de fluidos hídricos.

3.3.4.2. Variables agrohidrológicas y edáficas: Evaporación del suelo, percolación, escorrentía superficial, estrato impermeable, cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no-saturada, profundidad del manto freático en el punto medio entre drenes (carga hidráulica), descarga de drenes (coeficiente de drenaje), conductividad hidráulica, espacio poroso drenable, y transmisividad.

3.3.4.2.1. Evaporación del suelo

Esta variable se evaluó diariamente mediante dos lisímetros de pesada instalados en el espaciamiento de 20 m entre líneas de drenes del lote D-5 (Figuras 13 y 15). Su construcción es de lámina galvanizada cuyas dimensiones son 25.2 x 25.2 x 50 cm. Se analizaron como datos de entrada al modelo de balance hídrico.

3.3.4.2.2. Percolación

Se midió el volumen de agua percolada que se encontraba en los depósitos de drenaje de los lisímetros instalados en el espaciamiento de 20 m entre líneas de drenes

del lote D-5 (Figuras 13 y 15). Los datos de recarga al manto freático fueron analizados como entrada al modelo de balance hídrico.



Figura 15. Medición de la evaporación y percolación del agua en el suelo (Lote D-5).

3.3.4.2.3. Escorrentía superficial

En el espaciamiento de 20 m entre líneas de drenes en el Lote D-5, se acondicionaron dos parcelas con áreas de captación de 9 y 36 m² respectivamente (Figuras 13 y 16), delimitándose con bordos, para evitar de esta manera la entrada de escorrentía superficial de áreas aledañas y además se controló la salida. El flujo de cada área de captación se condujo a un depósito con capacidad de un metro cúbico, cada depósito tenía una llave que permitió la medición del agua escurrida almacenada y la evacuación de dichos depósitos. Se analizó como dato de entrada para el modelo del balance hídrico.

3.3.4.2.4. Profundidad al estrato impermeable

La profundidad permeable que determina el espesor del acuífero libre fue estimado en 31 sitios de muestreo dentro del módulo de drenaje. Esta distancia comprendió de la superficie del suelo hasta la profundidad en que se encontró el estrato endurecido o

semipermeable. El análisis con técnicas de interpolación Kriging permitió definir la configuración espacial del acuífero por debajo del nivel de los drenes.



Figura 16. Parcela para la evaluación del escurrimiento superficial (lote D-5).

3.3.4.2.5. Cambio en el almacenamiento de agua en el perfil del suelo en la zona no saturada

El contenido de humedad del suelo se determinó por el método gravimétrico; se tomaron muestras a diferentes profundidades del perfil del suelo (0-30, 30-60, 60-90 y 90-120 cm); el sitio de muestreo se realizó a la mitad de la distancia de los espaciamientos entre drenes en el módulo de drenaje (Figura 17); la frecuencia en la toma de muestras se efectuó cada semana.

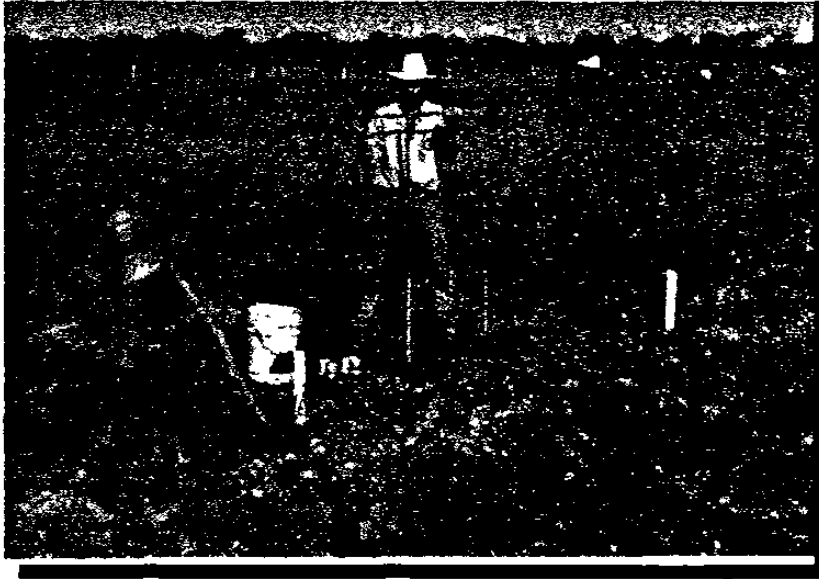


Figura 17. Muestreo de la humedad del suelo entre líneas de drenes.

3.3.4.2.6. Profundidad del manto freático en el punto medio entre drenes (carga hidráulica)

Para llevar a cabo la evaluación de esta variable se instalaron 108 pozos de observación en toda el área de drenaje subterráneo, ubicando 5 pozos por espaciamiento con sus respectivas repeticiones. La profundidad del manto freático fue medida en dichos pozos de observación con sonda acústica y cinta métrica (Figura 18).



Figura 18. Medición de la profundidad del manto freático en los pozos de observación.

La fluctuación del manto freático fue estudiada a través del tiempo y espacio. Las cargas hidráulicas de los diferentes espaciamientos del sistema de drenaje se analizaron con hidrogramas y análisis de regresión múltiple en función de otros factores hidrológicos para cada espaciamiento.

3.3.4.2.7. Descarga de drenes (coeficiente de drenaje)

La variable descarga de drenes se evaluó utilizando tres instrumentos de medición: a) Aforos con cubos de volumen conocido y cronómetro, b) Registradores de descarga (automáticos y sensores) instalados a la salida de los drenes (Figura 19) y c) Vertedores rectangulares. El flujo del agua subterránea en el sistema de drenaje fue evaluado con un análisis de hidrogramas de descargas de drenes expresado como coeficiente de drenaje (mm día^{-1}). Se analizó con técnicas de regresión múltiple y simple.



Figura 19. Medición de la descarga de los drenes con el aforador de sensores.

3.3.4.2.8. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica del suelo se estimó por el método de la relación entre la carga hidráulica en el punto medio entre drenes y la descarga de los drenes (coeficiente de

drenaje) (Pissani,1975). Se analizó con los modelos de Boussinesq y Hooghoudt los cuales son expresados por las ecuaciones siguientes:

Modelo de Boussinesq:

$$\frac{s}{h} = \frac{3.46K}{L^2} h \quad (21)$$

donde:

s = descarga de drenes (mm día⁻¹).

h = carga hidráulica en el punto medio (mm).

K = conductividad hidráulica (m día⁻¹).

L = espaciamiento entre drenes (m).

Modelo de Hooghoudt:

$$s = \frac{8K_2 dh}{L^2} + \frac{4K_1 h^2}{L^2} \quad (22)$$

donde:

s = descarga de drenes (mm día⁻¹).

K₁ = conductividad hidráulica del suelo sobre el nivel de los drenes (m día⁻¹).

K₂ = conductividad hidráulica del suelo bajo el nivel de los drenes (m día⁻¹).

d = estrato equivalente (m).

h = carga hidráulica en el punto medio entre drenes (mm).

L = espaciamiento entre drenes (m).

Para la estimación de la conductividad hidráulica se aplicó un análisis de regresión simple, utilizando la relación s/h en función de h; en donde la pendiente de la línea recta equivale:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{3.46K}{L^2} \quad (23)$$

despejando conductividad hidráulica tenemos:

$$K = \frac{L^2 \operatorname{tg} \alpha}{3.46} \quad (24)$$

Para el modelo de Hooghoudt se analizó por regresión lineal simple, determinándose los coeficientes correspondientes:

$$s = \beta_0 h + \beta_1 h^2 \quad (25)$$

donde:

$$\beta_0 = \frac{8K_2 d}{L^2} \quad (26)$$

$$\beta_1 = \frac{4K_1}{L^2} \quad (27)$$

3.3.4.2.9. Espacio poroso drenable

El espacio poroso drenable fue determinado de las evaluaciones directas realizadas en campo, época en que la evaporación es baja. Para calcular la porosidad efectiva se aplicó la relación existente entre las cargas hidráulicas (mm) medido en el punto medio entre drenes y las descargas de drenes como coeficientes de drenaje en (mm día⁻¹). Esta variable fue analizada según el modelo propuesto para el balance de agua en la zona saturada (Martínez, 1978):

$$R + S = G + D_r - \mu \Delta h \quad (28)$$

donde:

R= cantidad de agua percolada (mm).

S= cantidad de infiltración (mm).

G= carga por efecto de capilaridad (mm).

D_r = cantidad de agua drenada (mm).

μ = espacio poroso drenable (mm mm^{-1}).

Δh = decremento de carga hidráulica en el punto medio de drenes (mm).

De acuerdo a las condiciones ambientales de la zona y del proceso de drenaje, cuando la infiltración cesa, la percolación tiende a ser cero; en este momento el contenido de humedad en la zona radicular es cercano a la capacidad de campo y la carga hidráulica capilar es insignificante por la baja evaporación existente. Bajo estos supuestos el modelo de balance de agua puede estimar al espacio poroso drenable como:

$$\mu = \frac{D_r}{\Delta h} \quad (29)$$

3.3.4.2.10. Transmisividad

Para el análisis y evaluación del flujo del agua a través de capas semipermeables, se estimó la transmisividad como el producto de la conductividad hidráulica y el espesor del acuífero libre no confinado.

3.3.4.3. Cultivos

3.3.4.3.1. Maíz (*Zea mays L.*).

El cultivo fue establecido en los lotes C-7 y D-6, en el primero se cubrieron los cinco espaciamientos de drenaje (10, 20, 30, 35 y 50 m) abarcando un total de 4 ha; en el segundo lote se sembró solamente en el espaciamiento de 30 m. Figuras 12 y 14. La siembra se realizó el 14 de Julio de 1996 utilizando el híbrido A-775. Las labores de cultivo

realizadas fueron barbecho, rastreo, control de malezas, control de plagas y fertilización. Para esta última actividad se utilizaron 86 unidades de nitrógeno en dos aplicaciones, la mitad al momento de la siembra utilizando como fuente el fertilizante triple 17 y el resto a los 52 días, utilizando como fuente urea. 40 unidades de fósforo y 40 unidades de potasio se aplicaron al momento de la siembra, la aplicación del fertilizante se realizó por planta. El rendimiento de grano (Kg ha^{-1}) se evaluó por espaciamiento.

3.3.4.3.2. Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

El cultivo de caña de azúcar variedad Mex 69-290, se estableció en Julio de 1995 en el lote C-6 en el espaciamiento de 30 m y en el lote D-6 en el espaciamiento de 40 m (Figuras 11 y 14). La preparación del terreno consistió en barbecho y rastra. La siembra fue a doble cordón con punta y cola encontrados. Se utilizaron doce toneladas de semilla para obtener una densidad de siembra de 115,000 yemas por hectárea aproximadamente, la semilla se sometió a un tratamiento preemergente a base de cal hidratada para prevenir enfermedades fungosas y acelerar la germinación. La dosis de fertilización fue de 160-80-80. El rendimiento (t ha^{-1}) se evaluó en los ciclos de plantilla y soca; además, se consideraron los antecedentes históricos de rendimientos de los ciclos agrícolas 1992, 1993 y 1994 en los diferentes espaciamientos del módulo de drenaje.

3.3.4.4. Balance de agua

Tomando en consideración la época en que se llevó a cabo el trabajo, el modelo del balance de agua fue considerado como un método directo para estimar la evapotranspiración potencial:

$$P + G + S = E + R + \Delta w \quad (30)$$

donde:

P = cantidad efectiva de precipitación (mm)

G = cantidad de agua capilar aportada (mm)

E = cantidad de agua evaporada (mm)

R = cantidad de agua percolada (mm)

S = cantidad de agua escurrida subsuperficialmente (mm)

Δw = cambio en el contenido de agua almacenada (mm)

Cuando inicia el período de recesión, el manto freático decrece paulatinamente, en este proceso la evaporación es pequeña y el contenido de humedad es cercano a capacidad de campo, por lo que la cantidad de agua capilar puede considerarse nula ($G=0$), por lo tanto la percolación neta (R_n):

$$R_n = R - G \quad (31)$$

$$R_n = R \quad (32)$$

Si se considera que una fracción del agua percolada se pierde por efecto de drenaje natural y artificial en la zona saturada entonces:

$$R_n = D_{ra} + \mu \Delta h \quad (33)$$

donde:

D_{ra} = drenaje artificial (mm)

μ = espacio poroso drenable (%)

Δh = cambio en el manto freático (carga hidráulica, mm)

Cuando el proceso de percolación ocurre y el valor es alto por efecto de lluvias intensas, entonces el contenido de humedad en la zona no saturada corresponde aproximadamente a capacidad de campo, por lo que la relación entre el contenido de humedad (Δw) es insignificante para el período considerado, entonces:

$$P = E + D_{ra} + S \quad (34)$$

3.4. Tercera etapa

3.4.1. Modelos

Cuando se requiere generar modelos para conocer los procesos que ocurren dentro del suelo y sus relaciones con el medio ambiente, es necesario categorizar por medio de técnicas estadísticas.

Para la generación de modelos y la predicción de la relación entre la descarga de drenes en función de las variables: carga hidráulica, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación pluvial, evaporación y temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad; se utilizaron técnicas de regresión lineal simple y múltiple por el método de selección del modelo de stepwise. Este mismo proceso fue aplicado para modelar la relación entre la carga hidráulica en función de la descarga de drenes, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación pluvial, evaporación y temperatura del suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad.

Para seleccionar las variables independientes que presentaron significancia estadística en la formulación del modelo matemático que describe la relación funcional entre la variable coeficiente de drenaje y las variables carga hidráulica, conductividad hidráulica, transmisividad, precipitación pluvial, evaporación, temperatura de suelo a 0, 10, 20 y 50 cm de profundidad, se utilizó el procedimiento de técnicas de regresión múltiple por el método de selección del modelo de stepwise.

La generación del modelo de predicción de la carga hidráulica (h), en función del espaciamiento entre drenes subterráneos se realizó con la transformación de los datos de h a $x + 1$ para estabilizar de esta manera la varianza de los datos con mayor eficacia (Snedecor y Cochran, 1967). Los mismos datos fueron analizados mediante diseño experimental completamente al azar tomando como repetición las observaciones diarias; los tratamientos fueron los espaciamientos y la variable respuesta cargas hidráulicas en el punto medio entre drenes. La significancia estadística entre tratamientos promovió la evaluación de comparación de medias por el método de Tukey.

El comportamiento del modelo fue probado con procedimientos estadísticos de análisis de varianza, prueba de t para definir las hipótesis de igualdad de los coeficientes de

regresión, pruebas de grado de funcionalidad del modelo y $R^2_{ajustada}$. Se compararon los valores predictivos de coeficientes de drenaje, contra los valores observados en campo utilizando prueba de medias con dos poblaciones por el método de mínimos cuadrados. Se usó el coeficiente de correlación múltiple parcial para describir la relación total que existe entre una variable dependiente y dos o más independientes, controlando el efecto de otras variables.

Para el proceso de modelación, se utilizaron los datos de campo del espaciamiento de 30 m entre drenes del Lote D-5 por presentar homogeneidad y porque en investigaciones realizadas dentro del módulo de drenaje, se han encontrado las mejores respuestas de rendimiento en los cultivos de maíz, caña de azúcar y chile.