

Espaciamiento de drenes subterráneos en regiones húmedas y subhúmedas

Coras M., P. M.¹; Reyes R., A.¹; Diakit  D., L.¹; Sánchez A., Ma. M.¹; Arteaga T., E.¹

¹Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco, c.p. 56230 Chapingo, Edo. de México. Correo e.: mpcoras@gmail.com, areyes@correo.chapingo.mx, mastello83@hotmail.com

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua

RESUMEN

Los excesos de agua sobre las superficies y perfiles de los suelos afectan significativamente la producción agrícola, este trabajo tiene como objetivos analizar lluvias diarias de 25 años (1998-2012) de seis estaciones meteorológicas con funciones de distribución de valores extremos para encontrar las lluvias críticas que se usan para estimar los escurrimientos superficiales y espaciamientos de drenes laterales paralelos subter neos, la información pluviométrica se analizó con la función Gumbel doble y se obtuvo las lluvias críticas para diferentes periodos de retorno, con ellas se estimaron las escorrentías superficiales evacuando con drenes colectores y se aplicó la ecuación de régimen variado para abatir niveles freáticos de los suelos. Se encontró para periodos de retorno de 10 y 20 años y tiempos de drenaje de 8 y 12 horas, las lluvias de diseño máximas (256.8 mm) en el norte y las mínimas (162.3 mm) en el centro y sur del municipio en estudio, los gastos de escurrimiento superficiales en áreas cultivadas de maíz, frijol y chile verde variaron de 0.81 a 1.23 m³/s, localizándose los valores menores en el sur-este y los máximos en el norte. Los espaciamientos estimados de drenes subter neos entubados en las seis estaciones variaron de 15 m (maíz), 20 m (frijol) y 24 m (chile verde) abatiendo en tres días los niveles freáticos a profundidades por debajo del sistema radicular de los cultivos establecidos.

PALABRAS CLAVE

Escurrimiento superficial, Drenaje Agrícola.

INTRODUCCIÓN

El Estado de Tabasco, se ubica en la zona de ondas tropicales y aire húmedo proveniente de los océanos Pacífico y Atlántico que generan intensas y continuas lluvias, particularmente en la Sierra Norte de Chiapas y cuencas de los ríos Mezcalapa y Usumac nta, afectando la región, principalmente el Carrizal y el Samaría, causando elevaciones en el nivel de los ríos e inundando las tierras agrícolas, (SEDESOL, 2010)

Por otra parte en el estado de Tabasco la deforestación, azolvamiento de los cauces naturales y precipitaciones extremas, son causas principales de las inundaciones y saturan los terrenos agrícolas afectando a los municipios de Centla, Jonuta, Emiliano Zapata, Tenosique, Balanc n y Macuspana (INAFED, 2010).

Los problemas de inundación pueden resolverse instalando un sistema de drenaje superficial, cuyo objetivo es remover los excesos de agua de la superficie del terreno y consta de una red de surcos o zanjas poco profundas que recogen la escorrentía superficial, y descargan directamente a los drenes colectores, que evacúan el caudal de drenaje superficial fuera de la explotación. (Martínez, 1986).

La necesidad de drenaje superficial se justifica en zonas donde los factores climáticos, las condiciones hidrológicas, las características de los suelos, la topografía y la utilización de la tierra dan lugar a que el agua permanezca sobre la superficie del suelo, durante un tiempo superior al que los cultivos pueden soportar sin manifestar serios efectos sobre los rendimientos o sobrevivencia. (Villón, 2007)

Por otra parte, el drenaje subterráneo, tiene como finalidad controlar la posición de la superficie del nivel freático o capa freática, de forma que el balance de agua y sales en la zona radicular sea favorable para los cultivos. Generalmente, el nivel freático se ubica sobre un estrato impermeable, el cual impide el movimiento vertical del agua, produciendo la condición de suelo saturado. (Villón, 2007)

En los sistemas llamados simples, los drenes son de tubería y desaguan mediante un tubo de salida en los colectores que son zanjas abiertas. En los sistemas llamados compuestos los colectores son de tubería; la estructura de salida del lateral es una pieza de unión entre tuberías de distintos diámetros. (Martínez, 1986)

En el municipio de Macuspana, motivo del estudio, las ondas tropicales y aire húmedo proveniente de ambos océanos, generan intensas lluvias causando inundaciones y saturación de los perfiles de los suelos. Ambos casos afectan la producción agrícola y pecuaria con altos costos sociales y económicos. Por lo anterior, considerando las pérdidas económicas en los últimos años por inundaciones superficiales, presencia de niveles freáticos en terrenos agrícolas sembrados de maíz, chile verde, frijol y pasto; y para asegurar la aireación del suelo, absorción de agua y nutrientes por el sistema radicular, como solución, se plantean los siguientes objetivos: a) Analizar las lluvias diarias con funciones de distribución de valores extremos y encontrar las lluvias críticas para estimar las escorrentías superficiales que serán evacuadas de los terrenos sembrados. d) Determinar los espaciamientos de drenes laterales parcelarios subterráneos, aplicando la ecuación de régimen transitorio para abatir los niveles freáticos del perfil de los suelos y asegurar la producción agrícola.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Localización:

El municipio de Macuspana, edo. de Tabasco se ubica dentro de las coordenadas geográficas 17°32' y 18°10' latitud norte, 92°08' y 92°43' longitud oeste, con una extensión de 2,551.70 km², colinda al norte con los municipios de Jonuta, Centla y Centro, al este y sur con el estado de Chiapas y al oeste con los municipios de Tacotalpa, Jalapa y Centro. Se presentan dos tipos de climas, el 46.21 por ciento de la superficie del municipio es cálido húmedo con lluvias todo el año y 53.79 por ciento cálido húmedo con abundante lluvia en verano (INEGI, 1994).

Características de los suelos: INAFED (2010) En el sur, norte y oeste del municipio, se tienen suelos clasificados como gleysoles que son generalmente de texturas arcillosas o francas, presentando problemas de exceso de humedad. Al Este se tienen suelos vertisoles que son muy arcillosos, presentan fuertes agrietamientos en la época de secas y problemas de drenaje. En el centro del municipio se encuentran suelos acrisoles y rendzinas; ricos en materia orgánica y materiales calcáreos, asociados a pendientes abruptas y pequeñas áreas de fluvisoles, que son suelos francos de buena fertilidad.

Información pluviométrica: Los datos de la precipitación diaria de 25 años (1988-2012) se obtuvieron del portal digital del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y cerca de la zona de estudio son: Salto de Agua (DGE) 07141, Jonuta 27028, Macuspana (DGE) 27030, Tres Brazos 27050, Dos Montes 27065, Aquiles Serdán 27071.

Para generar lluvias diarias faltantes de las series, se utilizó el método U.S. National Water Service (WS) ASCE, 1996. En la agrupación de las lluvias de 2, 3, 4 y 5 días consecutivas se aplicó promedios móviles (Donazar et. al., 1978), analizando con la función de distribución Gumbel Doble.

Distribución Gumbel Doble: Campos (1998) hace referencia a que, en algunos casos, como por ejemplo en zonas costeras del Golfo de México y el Océano Pacífico se puede observar la existencia de dos grupos de datos de precipitaciones con características diferentes, el primero originado por precipitaciones debido a los fenómenos dominantes en la región y el segundo, originado por precipitaciones de origen ciclónico, que comúnmente provocan las avenidas más grandes. Por ello, el ajuste de una función de distribución de probabilidad de una población (por ejemplo, Gumbel) no resulta del todo satisfactorio. Por esto es necesario hacer análisis de frecuencias considerando que los gastos máximos anuales se originan por dos procesos diferentes que dan lugar a una función de distribución mezclada o de dos poblaciones, como la función Distribución de Doble Gumbel que ha sido aplicada en regiones húmedas y subhúmedas de México por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y CONAGUA.

Para realizar el análisis de frecuencias, es posible aplicar la función de distribución doble Gumbel para dos poblaciones considerando que los grupos son mutuamente excluyentes, es decir el valor de la variable se debe a un evento ciclónico o no. La $F(x)$ (función de distribución acumulada) para una muestra que presente la presencia de dos poblaciones está definida como: (Gómez et.al., 2010)
La función de densidad de probabilidad está dada por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \frac{P}{\alpha_1} e^{-\frac{(x-\beta_1)}{\alpha_1}} e^{-\frac{(x-\beta_1)}{\alpha_1}} + \frac{1-P}{\alpha_2} e^{-\frac{(x-\beta_2)}{\alpha_2}} e^{-\frac{(x-\beta_2)}{\alpha_2}} \quad (1)$$

Y la función de distribución de probabilidad $F(x)$ es:

$$F(x) = P e^{-e^{-\frac{(x-\beta_1)}{\alpha_1}}} + (1-P) e^{-e^{-\frac{(x-\beta_2)}{\alpha_2}}} \quad (2)$$

Donde:

P = Probabilidad de tener eventos no ciclónicos, adimensional.

x = Variable aleatoria para la cual se estima la probabilidad de no excedencia.

α_1 = Parámetro de escala de la población no ciclónica.

β_1 = Parámetro de ubicación de la población no ciclónica.

α_2 = Parámetro de escala de la población ciclónica.

β_2 = Parámetro de ubicación de la población ciclónica.

El cálculo del evento correspondiente a una probabilidad de excedencia $(1-F(x))$ o un periodo de retorno Tr se realiza por iteraciones o por algún método numérico como puede ser Newton- Raphson, debido a que la variable x no se puede despejar de la $F(x)$

Los parámetros de ubicación β_1 y β_2 y escala α_1 y α_2 fueron calculados con los métodos de momentos y máxima verosimilitud. Para determinar los valores de las variables de diseño para diferentes periodos de retorno, se aplicó el método de "Error cuadrático" que minimiza la suma de los errores cuadráticos pesados (E) entre los valores empíricos de la función de distribución de probabilidad acumulada ($F(x)$) y los valores estimados (Gómez et. al, 2010).

Se comprobó su ajuste de la función de Distribución Gumbel Doble con las pruebas de Kolmogorov Smirnov y Error Estandar (Chow, 1994). Aprobadas las pruebas de ajuste se elaboraron las curvas precipitación-duración-frecuencia (PDF) de las seis estaciones.

Esguerramiento Superficial: El gasto de las escorrentías superficiales puede ser estimado con base a la precipitación. Existen varios métodos cuya precisión depende del tipo de información y del grado de

detalle que se desee obtener (Rojas, 1979) basado con la información de campo como cobertura vegetal, tipos de suelo y pendiente del terreno, información que fue validada con INEGI, 1994. Se seleccionaron los métodos para estimar las escorrentías y gastos superficiales.

Método Racional: Sánchez (2003), este método es muy utilizado debido a su sencillez y puede ser expresado por:

$$Q = 0.278CIA \quad (3)$$

Dónde: Q : Esgurrimiento máximo, (m^3/s), C : Coeficiente de escurrimiento,

i : Máxima intensidad media de la lluvia crítica, para una duración de t_c , (mm/h)

A : Área efectiva de la cuenca (ha)

El valor de C está relacionado con la cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente del terreno para más de un tipo de topografía o cobertura vegetal, se estima con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i} \quad (4)$$

Para aplicar a cada estación meteorológica se estimó la intensidad de la lluvia en $mm \cdot h^{-1}$, dividiendo la lluvia de diseño entre el tiempo de drenaje. Para estimar el coeficiente de escurrimiento (C) se consideró cobertura vegetal de cultivos, tipo de suelo y la pendiente de 0.1% obtenidos de las cartas topográficas del INEGI (E15-5, E15-8) escala 1: 250,000.

Método del Balance: De acuerdo a Rojas (2002) y Aparicio (2004), esta ecuación se basa en la ecuación simplificada del balance hídrico para estimar el escurrimiento en una cuenca agrícola.

$$E = P - I - Et \quad (5)$$

Donde: E : Esgurrimiento total durante el tiempo de drenaje (mm/td), P : Lluvia de diseño durante el tiempo de drenaje (mm/td), I : Infiltración total durante el tiempo de drenaje (mm/td), Et : Evapotranspiración durante el tiempo de drenaje (mm/td).

Las evapotranspiración de referencia de los cultivos (Et) fueron estimados por el método de Hargreaves y Samani (1985), considerando los meses de siembra Y cosecha según el INIFAP.

La velocidad de infiltración se obtuvo en función de la textura del suelo para los tiempos de drenaje de cada cultivo y la lluvia de diseño del periodo de retorno de 25 años.

La evapotranspiración del cultivo (Et_c) se obtuvo multiplicando (Et) por su coeficiente de cultivo (K_c).

Fórmula de Mc Math: Esta fórmula es inducida a partir de transformaciones hechas al Método Racional Modificado (Batista, 1983). La descarga de diseño (Q) se estima a partir de:

$$Q = 0.0091CiA^{4/5}S^{1/5} \quad (6)$$

Donde: Q = Esgurrimiento máximo (m^3/s), C = Coeficiente de escurrimiento de McMath tomado de Batista (1983), i = Intensidad de la lluvia (mm/h), A = Área de la cuenca (ha), S = Pendiente máxima (m/m).

El coeficiente de escurrimiento de Mc Math (C) se determina a partir de la suma de tres coeficientes relacionados con el tipo de vegetación, suelo y topografía.

El coeficiente de escurrimiento de Mc Math, para el maíz, frijol y chile verde se consideró cobertura vegetal de buena a regular, suelo pesado y una topografía plana para los tres cultivos, los valores de C fueron: maíz 0.34, frijol 0.42 y chile verde 0.42.

Método del Número de curva (NC): De acuerdo a Soil Conservation Service de U.S.A. (1972), este método se basa en la relación que existe entre la infiltración, escorrentías potenciales y los valores reales de ambos. La relación fundamental es:

$$\frac{F}{S} = \frac{E}{Pe} \quad (7)$$

Donde: F = Infiltración real (L), S = Infiltración potencial (L), E = Escorrentía real (L), Pe = Escorrentía potencial o exceso de precipitación (L).

La expresión anterior se considera válida a partir del inicio de la escorrentía. Toda la precipitación ocurrida antes del inicio de ésta es considerada como pérdida y no atribuye al flujo superficial. Éstas pérdidas son denominadas abstracciones iniciales (Ia) y consta de varios componentes. De acuerdo a lo anterior:

$$Pe = P - Ia \quad (8)$$

$$F = Pe - E \quad (9)$$

Combinando las ecuaciones, se obtiene:

$$E = \frac{(Pe)^2}{Pe + S} \quad (10)$$

Un estudio de gran cantidad de tormentas permitió la obtención de una relación empírica entre Ia y S .

$$Ia = 0.2 S$$

$$E = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S} \quad (11)$$

Sustituyendo se obtiene:

El SCS luego de analizar una gran cantidad de hidrogramas de cuencas experimentales ha confeccionado un procedimiento para estimar S con base a un valor llamado CN (Curve Number) que se relaciona con S por la ecuación:

Para obtener S en centímetros se utiliza:

$$S = \frac{2540}{CN} - 25.4 \quad (12)$$

El número de curva (CN) se obtiene despejando la ecuación en:

$$CN = \frac{1000}{S + 10} \quad (13)$$

Para conocer el CN es necesario conocer la condición de humedad antecedentes

Determinada la lluvia de diseño y humedad antecedente II, para el Maíz y el Chile verde, y conociendo el uso de la tierra, surcos rectos, condición hidrológica buena y grupo hidrológico D, resulta el número de curva (NC) 89. Para el número de curva (NC) obtenida fue 85.

El escurrimiento máximo se obtiene a partir del área de la cuenca, a través de las siguientes expresiones.

$$\text{Cuenclas } > 50 \text{ ha } Q = CA^{5/6} \left(\frac{l}{s}\right) \text{ donde } C = 4.573 + 0.169 \frac{E \cdot 24}{td} \quad (14)$$

$$\text{Cuenclas } < 50 \text{ ha } Q = Cd A \left(\frac{l}{s}\right) \text{ donde } Cd = \frac{2.78 E}{td} \quad (15)$$

Donde:

E= Escurrimiento, *mm*

Cd= Coeficiente de drenaje, $\frac{l}{s}/ha$

Td= tiempo de drenaje, h

Método de Boonstra: Donezar et.al (1978), para encontrar gastos de escurrimiento superficial, se trazan tangentes a partir de la capacidad máxima de almacenamiento de agua de los suelos en el eje de las lluvias a las distintas curvas de profundidad-duración-frecuencia de 25 años de periodos de retorno. La pendiente de la tangente indica la descarga de diseño. Al desplazar paralelamente la tangente hasta el origen de los ejes coordenados se puede obtener dicha descarga.

Obtenida la descarga de diseño se aplica la ecuación abajo señalada para calcular el gasto de diseño:

$$Q = \frac{qA}{86400} \quad (16)$$

Donde: Q= Gasto de diseño (m^3/s), q= Hidromódulo de descarga (mm/d), A= Área de la cuenca (*ha*)

Para estimar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo se consideró la textura franco arcilloso que predomina en el municipio de Macuspana capacidad de campo (CC=33), punto de marchitez permanente (PMP=20.5) densidad aparente (1.25 g/cm^3) y la profundidad de raíces (Maíz=0.8-1 m, Chile verde y Frijol=0.5 m), encontrando las capacidades de almacenamiento Maíz de 125 mm, Frijol y Chile Verde 62.5 mm. (Aguilera, et. al, 1996).

Los gastos de escurrimientos superficiales estimados por los métodos de Boonstra, Balnce, Numero de curvas, Racional y Mac Math, se seleccionaron en base a los gastos máximos y mínimos, el diseño hidráulico de los drenes colectores consistió en dimensionar las zanjas de secciones trapezoidales,

tomando en cuenta las características hidráulicas pendiente (S) 0.0001, rugosidad (n) 0.027 (Chow, 1982), talud 1.5:1 la velocidad máxima de 1.1 m/s y la mínima de 0.58 m/s . (Arteaga, 2009).

Fórmulas en Drenaje Agrícola: Pizarro (1978, 2002) para el dimensionamiento de los sistemas de drenaje, como espaciamiento y profundidad, con ciertas características de los suelos y cultivos propone el cuadro 1. Se permite que, como consecuencia de las precipitaciones, la capa freática se eleve hasta una profundidad “pr” medida desde la superficie del terreno, con una frecuencia de “N” veces por año. Los valores de “pr” se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Valores de pr para diferentes clases de cultivo.

Pr (m)			
Días después de la lluvia	Clase A	Clase B	Clase C
0	0.30	0.50	0.90
1	0.50	0.80	1.10
2	0.70	1.00	1.30
3	0.80	1.10	1.40

Clase A: pastos y gran parte de las hortalizas, Clase B: cultivos extensivos, Clase C: frutales.

Ecuación de Glover- Dumm aplicadas a regiones húmedas: Martínez (1986), la ecuación de Glover-Dumm fue deducida inicialmente para un acuífero homogéneo y de espesor constante, con una subida instantánea de la capa freática, debido a una elevación también instantánea del nivel del agua libre en unas zanjas que llegan hasta la capa impermeable. Una vez que cesa la recarga, la capa de agua baja por efecto del drenaje; las condiciones son entonces régimen variable.

La ecuación diferencial inicial se deduce de la combinación de la ecuación de continuidad aplicada a un elemento diferencial de la región de flujo y de la ley de Darcy, teniendo en cuenta las suposiciones de Dupuit. (Martínez, 1986)

La ecuación de continuidad resulta del balance de agua:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \mu \frac{\partial h}{\partial t} dx = 0 \quad (17)$$

La ley de Darcy:

$$q_x = -KD \frac{\partial h}{\partial x} \quad (18)$$

La expresión de la ecuación diferencial es:

$$KD \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (19)$$

Donde: μ = Espacio poroso drenable que se considera constante, $h=f(x, t)$ función de carga hidráulica, t = Tiempo (d), x = Distancia desde la zanja de drenaje (m), K = Conductividad hidráulica constante (m/d), D = Espesor contante del acuífero.

La ecuación se resuelve por el método de variables separadas para las siguientes condiciones de límite.

$$\begin{array}{lll}
 h = h_0 & 0 \leq x \leq L & t = 0 \\
 h = 0 & x = 0 & t > 0 \\
 h = 0 & x = L & t > 0 \\
 h = 0 & 0 \leq x \leq L & t = \infty
 \end{array}$$

La solución describe la posición de la capa freática respecto al nivel medio de los drenes. Esta posición es función de la distancia al dren (x) y del tiempo (t).

$$h(x, t) = \left(\frac{4h_0}{\pi}\right) \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-n^2 - ut} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (20)$$

Donde

$$\alpha = \frac{\pi^2 KD}{\mu L^2} \quad (21)$$

Factor de reacción α (d^{-1}), cuyo valor inverso $j = \frac{1}{\alpha}$ se llama coeficiente de embalse (d).

Para el cálculo del espaciado entre drenes interesa determinar la carga hidráulica en el punto medio entre dos drenes en función del tiempo, para $x = \frac{L}{2}$ se obtiene la siguiente expresión. (Martínez, 1986)

$$h_t = \frac{4h_0}{\pi} e^{-t/j} = 1.27h_0 e^{-t/j} \quad (22)$$

Donde: h_0 = Carga hidráulica inicial en el punto medio entre dos drenes (m), h_t = Carga Hidráulica en el punto medio entre dos drenes en el tiempo t (m).

Dumm posteriormente supuso que la forma inicial de la capa de agua, después de la elevación instantánea, era la de una parábola de cuarto grado, por lo que modificó ligeramente la ecuación:

$$h_t = 1.16h_0 e^{-t/j} \quad (23)$$

Sustituyendo el valor de j en la ecuación y despejando el espaciado se obtiene la expresión general de la ecuación de Glover Dumm:

$$L^2 = \frac{\pi^2 KD_t}{\mu \ln(1.16 \frac{h_0}{h_t})} \quad (24)$$

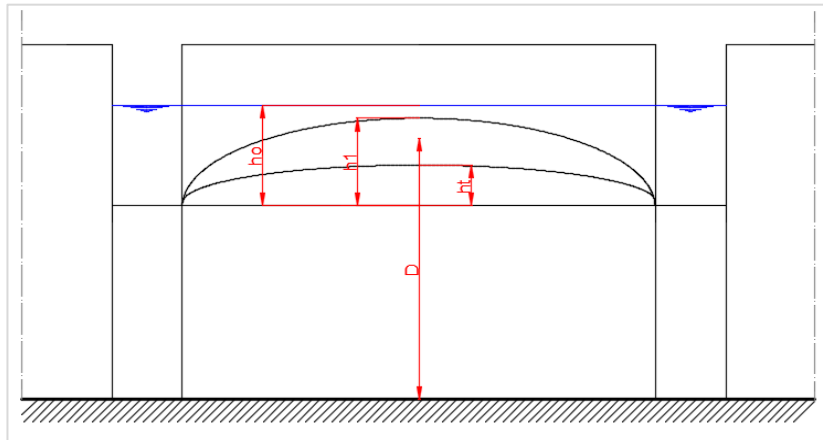


Figura 1. Región de flujo para la ecuación de Glover Dumm

El espaciamiento entre drenes se calcula con esta ecuación, una vez que se han determinado las características hidráulicas de la región de flujo (K , D , y μ) y se han establecido los criterios de descenso de la capa freática (h_o , h_t y t). (Martínez, 1986)

Para aplicar la fórmula de Glover-Dumm se consideró: porosidad drenable (μ) y conductividad hidráulica (k) se obtuvieron de Dieleman (1985), de acuerdo a la textura del suelo un $\mu = 0.08$ $k = 0.768 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$.

Las tuberías de los drenes parcelarios subterráneos fue de 4 pulgadas, profundidad de la capa impermeable 4 m y la profundidad de los drenes de 1.2-1.5 m. El Maíz y el Frijol clase B y Chile Verde clase A:

Curvas de precipitación- Duración- Frecuencia para diferentes periodos de retorno: Se calcularon las precipitaciones para los periodos de retorno (Tr), 5, 10, 20 y 25 años y la probabilidad de Gumbel Doble ($F(x)$) se obtuvo las presentaciones y se elaboró las curvas de Precipitación-Duración-Frecuencia y conocido los tiempos de drenaje maíz 24 h.horas, frijol y chile verde 8h, se obtuvieron las lluvias críticas (FIRA,1985).

$$Tr \frac{1}{1 f(x)} \quad (25)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 2 muestra las curvas de Precipitación-Duración-Frecuencia (PDF) de la estación 071410, en las abscisas los tiempos de drenaje (frijol, chile verde 8 h, maíz 24 h), al interceptar a dichas curvas para el periodo de retorno requerido, se obtuvieron las lluvias críticas, con la misma técnica se procedió en las cinco estaciones restantes.

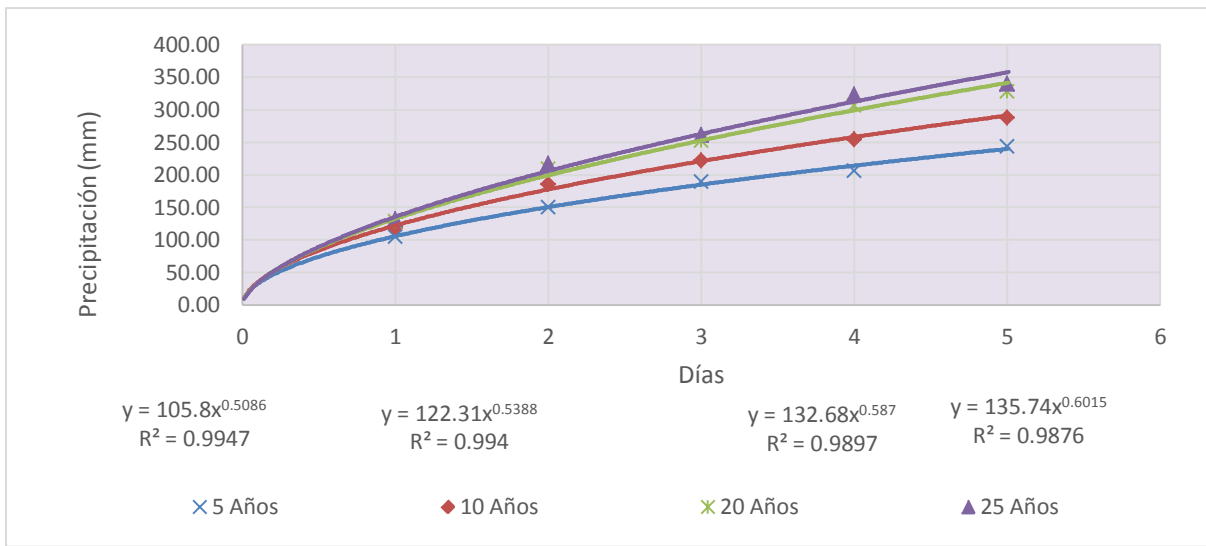


Figura 2. Lluvias críticas, estación 071410 Salto del Agua.

En la estación Tres Brazos (27050), ubicado en el norte del municipio se Macuspana se encontraron lluvias críticas máximas para periodos de retorno de 10 y 20 años, y fueron: frijol y chile verde 157.7 mm y 169.7 mm y maíz 225.4 mm, y 256.8 mm respectivamente. Las lluvias críticas mínimas, estación Aquiles Serdán (27071), localizado en el centro del municipio siendo para frijol y chile verde, en los periodos de retorno de 10 años (43.8 mm) y 20 años (85.8 mm) y maíz 10 años (92.00 mm) y 20 años (162.3 mm).

ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

El escurrimiento se calculó para el periodo de retorno de 25 años en superficies de 100 ha para cada cultivo (Maíz, Frijol y Chile verde), cultivos de mayor superficie sembrada de acuerdo al SIAP 2015.

Cuadro 2. Gastos de escurrimiento, Maíz.

Método/Estación	7041	27028	27030	27050	27065	27071
	Escurreimientos ($\frac{m^3}{s}$)					
Boonstra	0.542	0.713	0.617	1.685	1.391	0.702
Balance	0.324	0.681	0.627	1.233	1.080	0.519
NC	0.996	1.343	1.291	1.886	1.735	1.189
Racional	0.786	1.061	1.020	1.486	1.368	0.939
Mc Math	0.110	0.149	0.143	0.209	0.192	0.132

Mc Math estima los gastos de escurrimientos menores varían de 0.110 a 0.209 m^3/s se debe a los valores de los coeficiente de escurrimiento que son bajos (0.34 a 0.42) y la pendiente (0.01%), si se utilizaran estos gastos se obtendrían secciones hidráulicas pequeñas. El método del Número de Curva (NC) presenta los gastos de escurrimiento mayores de 0.996 a 1.886 m^3/s en todas las estaciones se debe al valor de NC (89) y las lluvias de diseño utilizado (0.996 $m^3 \cdot s^{-1}$). El método del Balance es el segundo en valores bajos variando de 0.324 a 1.080 $m^3 \cdot s^{-1}$ y los gastos de Boonstra en las estaciones 7041, 27028 y 27065 fueron valores más pequeños, en 27050 y 27065 los gastos aumentan porque los valores de los hidromódulos son mayores. El método racional en todas las estaciones presenta valores intermedios, por lo tanto, para el Maíz fue el mejor método.

Gastos de escurrimiento, cultivo frijol: el método de Boonstra presentó los valores mayores de 0.859 a $5.279 \text{ m}^3/\text{s}$ en todas las estaciones porque los hidromódulos calculados se relacionan con las láminas de agua a remover de la superficie. Mc Math presentó los escurrimientos menores (0.211 a $0.259 \text{ m}^3/\text{s}$) en todas las estaciones se debe a los valores del coeficiente de escurrimiento (C) (0.34 a 0.42) y la lluvia de diseño pequeños (43.8 mm). Los métodos de Balance, NC y Racional, presentan valores parecidos (1.008 a $2.907 \text{ m}^3/\text{s}$) en todas las estaciones, en los dos últimos métodos se debe a que ambos consideran varios factores para el cálculo del coeficiente de escurrimiento como tipo de suelo y la vegetación presente. Los gastos escurridos que se pueden usar para este cultivo corresponden a esos métodos.

Gastos de escurrimientos, cultivo de chile: Mc Math presentó los gastos menores (0.211 a $0.512 \text{ m}^3/\text{s}$) Boonstra los gastos escurridos mayores (0.859 a $5.279 \text{ m}^3/\text{s}$) en todas las estaciones. Los gastos calculados por Balance, NC y Racional, presentan valores (0.177 a $3.089 \text{ m}^3/\text{s}$) parecidos en todas las estaciones, siendo ligeramente que el Número de Curva.

Se encontró que los métodos que estima los gastos más apropiados para los tres cultivos fueron: Racional, el método de NC debido a que en el cálculo de los coeficientes de escurrimiento consideran: uso de suelo, tratamiento, condición hidrológica y grupo hidrológico, resultando un coeficiente (C) acorde a las condiciones del área de estudio.

Diseño Hidráulico de drenes colectores.

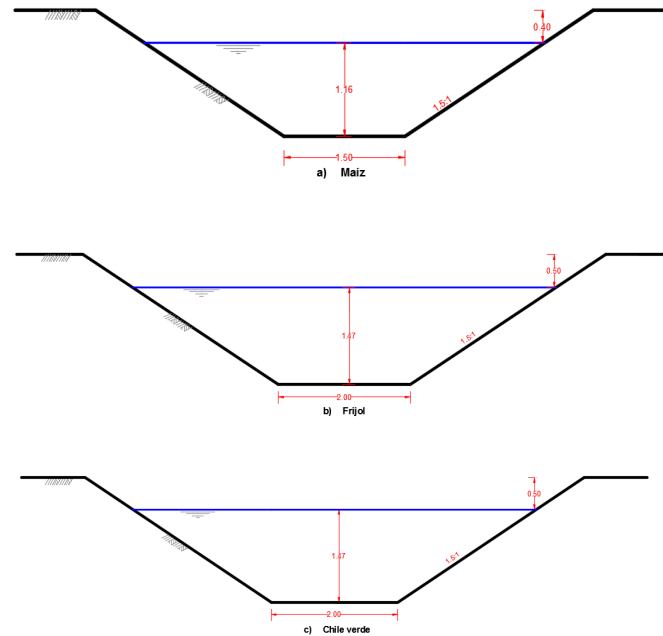
El cuadro 3 presenta las dimensiones obtenidas para los drenes tales como; gasto, área hidráulica, velocidad, tirante y libre bordo.

Cuadro 3. Características de los drenes para los tres cultivos.

Concepto	Maíz	Frijol	Chile verde
$Q (\frac{\text{m}^3}{\text{s}})$	1.061	2.041	2.041
n	0.027	0.027	0.027
s (adim)	0.0001	0.0001	0.0001
k (adim)	1.5	1.5	1.5
b (m)	1.5	2	2
d (m)	1.16	1.47	1.47
A (m^2)	3.758	6.190	6.190
V ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	0.281	0.332	0.332
e (m)	0.40	0.50	0.50

De acuerdo a Chow (1982) considerando las características edáficas de los drenes la rugosidad (n) 0.027 y según Faustino (1993) el talud más conveniente de acuerdo al tipo de suelo y la profundidad del dren $1.5:1$. Los gastos (Q) usados para determinar las secciones hidráulicas fueron: maíz ($1.061 \text{ m}^3/\text{s}$), frijol ($2.041 \text{ m}^3/\text{s}$) y chile verde ($2.041 \text{ m}^3/\text{s}$). Por las características señaladas se consideran canales pequeños o drenes colectores pequeños (gastos menores de $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$), puede no cumplir los requisitos de máxima eficiencia y de mínima infiltración en no revestidos, como es el caso en drenes colectores que trabajan en régimen uniforme.

La figura 5 secciones hidráulicas de los drenes.



El tirante de los drenes para el Maíz con respecto a los otros dos cultivos varía 0.27 m que conlleva a que la diferencia entre los valores del libre bordo sea de 0.05. La plantilla para los tres drenes fue de 1.5 m, presentando con esas características velocidades que se encuentran dentro de lo permisible (0.58 m/s).

Espaciamiento de drenes parcelarios entubados estación 07141, Salto de Agua.

De acuerdo a lo señalado en la Metodología en maíz y frijol pertenecen a la clase B y chile verde a la C, en el cuadro 4 se presentan las profundidades de los drenes, niveles freáticos, altura freáticas (h_t) y días después de las lluvias.

Cuadro 4. Criterios de drenaje para los tres cultivos estación 07141 Salto de Agua

Profundidad drenes	Maíz	Frijol	Chile Verde
	1.5	1.4	1.2
Días después de la lluvia	Altura freática h_t (m)		
0	1.0	0.9	0.9
1	0.7	0.6	0.7
2	0.5	0.4	0.5
3	0.4	0.3	0.4

Se observa profundidades de los drenes subterráneos que son diferentes para cada cultivo, Maíz 1.5 m, Frijol 1.4 m y Chile Verde de 1.2 m.

Las lluvias de diseño obtenido de las curvas de Precipitación-Duración-Frecuencia periodo de retorno de 10 años fueron: Frijol y Chile verde 67.6 mm y Maíz 122.3 mm . La lluvia de diseño del Maíz resultó ser mayor a la capacidad total de agua que puede almacenar el suelo ($122 \text{ mm} \cdot d^{-1}$), en estos casos la lluvia de diseño toma el valor de la capacidad total del suelo, el restante 0.3 mm de la lluvia deberá ser removido con drenes superficiales.

El espaciamiento entre los drenes se calculó aplicando la ecuación de Glover-Dumm, iterando a manera que se cumplieran los criterios de drenaje. Los resultados de los espaciamientos obtenidos para cada día se presentan en el cuadro 5. El espaciamiento para el día 0 no se presenta para el Frijol y el Chile Verde la altura del nivel freático inmediatamente después del término de la lluvia (h_o) resulta ser menor a lo requerido por el criterio de drenaje los cálculos se inició a partir del día 1 donde el nivel freático empieza a ascender.

Cuadro 5. Espaciamiento entre drenes para los tres cultivos estación 07141 Salto de Agua

Cultivos/ Días	Espaciamiento de drenes (m)		
	1	2	3
Maíz	15	15	15
Frijol	20	20	20
Chile Verde	25	24	24

En el cuadro 5 se presentan los espaciamientos de drenes para uno, dos y tres días que mantienen al nivel freático a profundidades por debajo del sistema radicular para cada cultivo. Finalmente el valor seleccionado en la separación de los drenes fueron: maíz (15m), frijol (20m) y chile verde (24m).

Los procesos descritos se aplicaron a las estaciones 27028 Jonuta, 27030Macuspana, 27050 Tres Brazos y 27065 Dos Montes.

En el cuadro 6 se presentan los espaciamientos de drenes promedio de las 6 estaciones, este criterio se toma debido a que los resultados obtenidos de separación entre drenes fueron semejantes en 1, 2 y 3 días. Para fines prácticos de diseño, construcción y funcionamiento de los procedimientos encontrados son recomendables.

Cuadro 6. Espaciamiento entre drenes subterráneos parcelarios.

Cultivos	Prof. drenes (m)	Espaciamiento entre drenes (m)		
		Día 1	Día 2	Día 3
Maíz	1.5	15	15	15
Frijol	1.5	20	20	19
Chile verde	1.4	25	22	22

El cuadro 6, muestra el producto de comparar la carga hidráulica inicial en el punto medio entre dos drenes en metros (h_o) con la altura freática (h_t). Se determinó para el día 1, no existe problema de saturación del suelo, para 2 y 3 días se propuso espaciamiento entre drenes hasta que los productos del factor de reacción (α) y tiempo (t) en días sea mayor a 0.2, asegurando el abatimiento del nivel freático hasta la profundidad permisible. Se encontró para lluvias críticas (122.3 mm) los espaciamientos entre drenes laterales paralelos fueron: maíz 15 m, frijol 19 m y lluvias críticas de 67.6 mm para chile verde 22 m. Los espaciamientos de drenes laterales paralelos reportados, son semejante a los obtenidos bajo condiciones edafológicas e hidrológicas similares en Brasil por Bernardo, et. al. ,2011.

Conclusiones

Se encontró para periodos de retorno de 10 y 20 años y tiempos de drenaje de 8 y 24 horas las lluvias de diseño máximas en el norte y las mínimas en el centro y sur del municipio en estudio.

Los gastos de escurrimiento superficiales en áreas cultivadas de maíz, frijol y chile verde variaron de 0.81 a 1.23 m^3/s localizándose los valores menores en el sur-este y los máximos en el norte.

Los espaciamientos estimados de drenes subterráneos entubados, abaten en tres días los niveles freáticos a profundidades por debajo del sistema radicular de los cultivos maíz, frijol y chile verde en el área de estudio.

Literatura citada

Aguilera, C.M., Martínez, E. R. (1996). Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera (1a ed.). Universidad Autónoma Chapingo, México.

Allen, R.G., Pereira, L.S, Raes, D., Smith, M. (2006). Evapotranspiración del Cultivo Guías para la Determinación de los Requerimientos de Agua de los Cultivos. FAO. Roma.

ASCE (American Society of Civil Engineers) 1996, Hidrology y Handbook, 2ed American Society of Civil Engineers New York, EE.UU 769 p.

Batista M., J. (1983). Escurrimiento superficial. Corporación de Desarrollo del Valle de San Francisco (CODEVASF). Brasília, Brasil.

Campos, A. D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

CENAPRED, 2013. Información de actividades. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación. SEGOB.

Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: Editorial Mc Graw-Hill Interamericana.

Chow, M.P.M. (1982). Hidráulica de Canales Abiertos (1ra edición). Editorial Diana. México.

Dieleman, P.J., Westcot, D.W. et.al. (1985) Elementos para el Proyecto de Drenajes. FAO. Roma.

Donezar, D. M., Elías, C. F., Martínez, B. J., y Cavanillas, L. I. (1978). *Principios y aplicaciones de drenaje* (1a ed.). The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI).

Ganancias, M. F. (2010). Estadística hidrológica. Universidad Nacional de Córdoba.

Gómez, M. J. F. et. al. (2010). Manual de análisis de frecuencias en hidrología. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Primera edición. México.

Grassi, C.J. (1966). Variación de la evapotranspiración Relativa Durante el Ciclo Vegetativo de los Cultivos. CIDIAT. Mérida, Venezuela.

Hargraves, G.H. and Z.A. Samani 1985, reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. am. soc. agric. eng. 1 (2) 96-99

INAFED, 2010. Síntesis Nacional para el Desarrollo de las comunidades. Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. www.inafed.gob.mx.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1994). Cuaderno estadístico municipal, Macuspana Estado de Tabasco.

Instituto Nacional para el Federalismo (INAFED). (2010). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, estado de Tabasco. Obtenido de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM27tabasco/index.html>. Recuperado el 8 de agosto de 2016.

Luque, J.A. (1981). Hidrología Agrícola Aplicada (1a ed). Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.

Luthin, J. (1967). Drenaje de Tierras Agrícolas. Centro Regional de Ayuda Técnica. México.

Martínez, B. J. (1986). Drenaje Agrícola (Volumen I). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario.

Norero, S. A. (1976). Evaporación y transpiración, Capítulo 4. Preparado para el curso de conservación de aguas y tierras. Centro Interamericano de Desarrollo Integral del Agua y Tierra CIDIA. Mérida, Venezuela.

Ortiz, S.C.A. (2011). Elementos de Agrometeorología Cuantitativa Con Aplicaciones en la República Mexicana (2a ed.). Texcoco, Estado de México.

Palacios O.L.V., Y.N. Nikolski, C.S. Landeros.J.L. Pimentel, C.A. Ramírez. (1993). Manual de drenaje parcelario de distritos de riego. CP-IMTA, Cuernavaca, México.

Pizarro, F. (1978). Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2a. ed. Agrícola Española. España.

Pizarro, T. R. (2007). Evaluación de métodos hidrológicos para la competición de datos faltantes de precipitación en estaciones pluviográfica de la VII región de Maule Chile. Universidad de Tacala. Chile.

Rojas, M. (2002). Diseño de drenaje superficial local. Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación. Chapingo, Estado de México, México.

Rojas, R.M. (1979). Hidrología de Tierras Agrícolas. Taller de Reproducción del CIDIAT

Sanchez, G.J. (2003). Manejo de Residuos Industriales (1a ed.). Universidad Autónoma de Agusacalientes. México.

SARH- IMTA. (1986).Manual de drenaje de Zonas tropicales. Dirección general de Irrigación y drenaje, México.

Soil Conservation Service (SCS). (1972). National engineering handbook. Hydrology Section 4, Chapter 4–10.

Villón, B.M., (2007). Drenaje (1a ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica, Costa Rica.