



## Anexo 11: Capacitación para diseño de drenaje agrícola en banano.

**Sistema de drenaje subterráneo.** Consiste de obras que se construyen bajo la superficie del suelo, para captar y desalojar excesos de agua derivados de filtraciones o de niveles freáticos elevados.

Pueden ser drenes interceptores colocados perpendicular o transversalmente a las líneas de corriente para recoger los flujos de agua libre y drenes colectores o de desagüe, orientados según las líneas de pendiente para conducir el agua fuera de la parcela. Estos a su vez, también deben desembocar a drenes superficiales colectores

Hay cuatro tipos de drenaje subterráneo:

- Zanjas abiertas profundas
- Zanjas profundas cubiertas con filtros de grava, arena, etc., así como con tubos.
- Drenes internos cilíndricos o tubulares sin revestimiento: drenes topo.
- Drenes internos cilíndricos revestidos o drenaje entubado, que es el más común en la actualidad.

### Especificaciones

**Diseño de la red.** Según Rojas (1976), el diseño de un sistema de drenaje superficial comprende dos fases principales, el trazo y el diseño de las secciones hidráulicas.

**Trazo de la red.** El trazo de la red de drenaje, consiste en la elaboración de un plano con la ubicación de cada uno de los drenes primarios y secundarios. Para dicho trazo se tomarán en cuenta según IMTA (1986), las siguientes especificaciones:

**Localización.** Los drenes deberán localizarse siempre sobre cauces naturales, con los acondicionamientos que requieran para darles la capacidad y funcionamiento adecuados, ya que en esta forma se logrará una economía en vías, obras y se evitan afectaciones innecesarias.

**Parcelamiento.** El trazado debe facilitar en lo posible un parcelamiento adecuado, ya que la tenencia de la tierra influye en la densidad de la red básica de drenaje. Así, mientras mayor sea el tamaño de los predios o lotes, menor será el número de los mismos y por lo tanto, la longitud de los canales de desagüe.

**Trazo.** IMTA (1986) señala que para tener un mejor funcionamiento hidráulico, es deseable que los canales de desagüe tengan trazo recto y que se eviten en lo posible cambios de dirección. Sin embargo, es mejor el que se obtiene mediante canales que sigan las partes de bajas de los

terrenos encharcados, en cuyo caso es necesario construir curvas en cada cambio de dirección. En general, deberán evitarse las curvas muy cerradas, eligiendo curvas suaves a fin de mejorar las características hidráulicas y la estabilidad de las secciones de los canales de desagüe.

El IMTA (1986) recomienda para el diseño de curvas las siguientes curvaturas mínimas señaladas en el Cuadro 1.

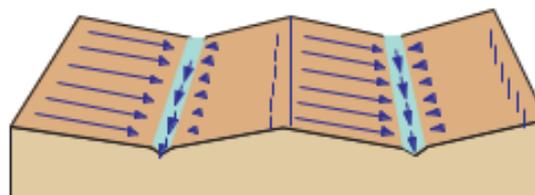
**Cuadro 1. Radios mínimos de curvatura (m) en suelos estables y sin protección en los márgenes.**

Zanjas pequeñas con ancho menor de 4.5 m.	Menos de 0.05	90	19
	De 0.05 a 0.10	122	14
Zanjas de tamaño mediano con un ancho de 4.5 a 10.7 m.	Menos de 0.05	152	11
	De 0.05 a 0.10	183	10
Zanjas grandes con ancho mayor a 10.7 m.	Menos de 0.05	183	10
	De 0.05 a 0.10	244	7

Fuente: IMTA, 1986.

De acuerdo con Palacios (2002), la disposición de los desagües y colectores parcelarios bajo distintas condiciones de pendiente de los terrenos son:

- Pendiente mínima. Los desagües y los colectores deben ser perpendiculares, que sus longitudes sean moderadas, con espaciamientos homogéneos y sus pendientes deben ser continuas.



**Figura 4. Distribución de planos de escurrimiento y desagües en terrenos sin pendiente.**

- Con pendiente hacia una sola dirección. Se deben ajustar los drenes de modo que las longitudes sean las adecuadas, de tal manera que no se alcancen velocidades de escurrimiento que provoquen erosión. Los colectores se colocan perpendiculares a la pendiente, en forma de tajos que captan los escurrimientos.

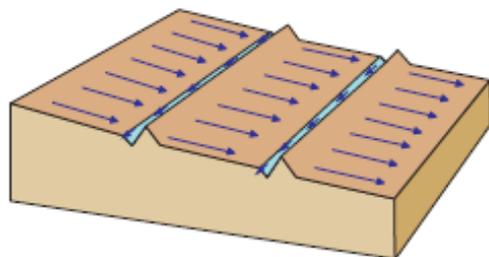


Figura 5. Distribución de planos de escurrimiento y desagües en terrenos con pendiente.

El diseño del sistema de desagües de acuerdo con Palacios (2002), consiste en:

- Localizar el sitio, generalmente de un colector, que puede ser una zona baja, donde se recibirán los volúmenes de agua removidos. Cuando las condiciones topográficas no permiten la salida gravitacional del agua, tiene que considerarse una estación de bombeo, con todo lo que esto implica.
- Definir la ubicación en planta de los desagües, lo que implica definir su espaciamiento y localización.
- Definir la capacidad de conducción y dimensiones de la sección hidráulica de los desagües y colectores de drenaje superficial.

**Estructuras.** Al momento de realizar los levantamientos topográficos, se localizan estructuras del sistema de desagüe y entre las principales están los puentes, alcantarillas, caídas, entradas de agua, vados, remates finales, etc.

**Diseño de las secciones hidráulicas.** La influencia de la rugosidad de taludes y fondo de un canal o dren se manifiesta en función del tamaño de la sección hidráulica. IMTA (1986), propone la siguiente relación:

$$n = 0.032 - 0.0071 \cdot \ln(r) \quad (1)$$

Donde:

n = Coeficiente de rugosidad (adimensional)

r = radio hidráulico, m

Los valores de los coeficientes de rugosidad se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de n para canales y zanjas dados por Hartón.

Superficie	CONDICIONES DE LAS PAREDES			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
En tierra, alineados y uniformes	0.17	0.20	0.0225	0.025
En roca, lisos y uniformes	0.025	0.030	0.033	0.035
En roca con salientes y sinuoso	0.035	0.040	0.045	s/d
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Dragados en tierra	0.025	0.0275	0.030	0.033
Con lecho pedregoso y bordos de tierra enhierbados	0.025	0.030	0.035	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.028	0.030	0.033	0.035

Fuente: Coras, 2000.

La Ecuación 1 o el Cuadro 2 se utilizará en base a la información disponible y cuando se utilizan ambos, es preferible utilizar el valor mayor.

**Velocidades máximas y mínimas permisibles "V" (m/s) en los drenes.**

**Velocidad máxima permisible.** Según Luthin (1967), para evitar el deslave en las zanjas abiertas desprovistas de vegetación, antes del diseño se deben conocer las velocidades máximas permisibles. En el cuadro 3 se muestran las velocidades máximas permisibles considerando el material en que reposan los canales.

Cuadro 3. Velocidades máximas permisibles en m/s para diferentes canales

Condición de canal	Vel. Max.
Arena fina	0.50
Franco Arenoso	0.58
Franco limoso aluvial	0.67
Franco Firme	0.83
Arcilla no plástica (coloidal)	1.25
Limos aluviales	1.25
Hardpans	2.00

Fuente: Coras, 2000.

**Velocidad mínima permisible.** Depende de la sedimentación, crecimiento de plantas acuáticas y control sanitario. La velocidad a la que no se produce sedimentación, depende del material transportado por el agua. En la práctica para asegurar el arrastre de limos, la velocidad debe ser mayor a 0.25 m/s y para arenas superior a 0.5 m/s. Según FIRA (1985), la velocidad mínima permisible es posible ob-



tenerla en el canal con la determinación de su pendiente mínima, de tal forma que se propicie la mínima sedimentación. Como se muestra en el Cuadro 4, la velocidad está en función del material de arrastre.

**Cuadro 4. Velocidades (m/s) mínimas en cauces para evitar la sedimentación**

Tipo de material	En el fondo	Media
Arcilla	0.08	0.11
Arcilla fina (2 mm)	0.16	0.23
Arena gruesa (5 mm)	0.21	0.30
Gravilla (8 mm)	0.32	0.46
Grava (25 mm)	0.65	0.93

Fuente: Pizarro, 1978.

El crecimiento de plantas acuáticas y de musgos puede disminuir grandemente la capacidad de descarga del canal, por lo que en general, una velocidad media de 0.75 m/s impedirá tal crecimiento, aunque la velocidad media del agua en los canales abiertos debe ser superior a 0.40 m/s. En las zanjas colectoras raramente será posible mantener estas velocidades mínimas, por lo que será necesario segar las plantas acuáticas con mayor frecuencia (ILRI, 1977).

**Sección típica.** Según IMTA (1986), para la red básica de drenaje se deben utilizar zanjas a cielo abierto de sección trapecial, cuyo nivel de agua esté siempre abajo del terreno, ya que solo en estas condiciones se permitirá el desfogue de los drenes superficiales y subterráneos, además del escurrimiento lateral del agua superficial hacia el interior de los mismos.

Para lograr lo anterior, es indispensable que toda la sección del canal de drenaje se forme mediante excavación de la cubeta de los canales de drenaje, con una profundidad mínima de 1.2 a 1.8 m, incluyendo el bordo libre del 25% de la profundidad de diseño, como lo señala Luthin (1967). En los suelos de turba y orgánicos, se debe incluir un valor adicional para considerar asentamientos.

**Taludes "Z".** La inclinación depende en cada caso particular de varios factores, pero muy particularmente de la clase de terreno donde están alojados. Por ejemplo, en un material rocoso se podrán permitir taludes que tiendan a ser verticales, en cambio en terrenos más arenosos se tendrá que construir con taludes más tendidos, para evitar derrumbes, etc., que elevan los costos de conservación (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Talud para secciones trapeciales en diferentes materiales.**

Características de los suelos	Canales poco profundos	Canales profundos
Roca en buenas condiciones	Vertical	0.25:1
Arcillas compactas o conglomerados	0.5:1	1.0:1
Limos arcillosos	1.0:1	1.5:1
Limos arenosos	1.5:1	2.0:1
Arenas sueltas	2.0:1	3.0:1

Fuente: Trueba, 1984.

Los taludes recomendados para los canales de desagüe se presentan en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Taludes para canales.**

Sección	Prof. (cm)	Taludes recomendados	Taludes mínimos
Triangular	0.30 – 0.60	6:1	3:1
Triangular	0.63 ó más	4:1	3:1
Trapezoidal	0.30 – 0.90	4:1	2:1
Trapezoidal	0.93 ó más	1.5:1	1:1

Fuente: Agricultural Engineers Yearbook, 1967, citado por Coras (2000).

IMTA (1986) sugiere que en el diseño del talud deberá prevverse el tipo de mantenimiento a realizar, pues éste, estará determinado por el talud como se observa en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Taludes de los canales de drenaje para varios métodos de mantenimiento.**

Tipo de mantenimiento	Taludes recomendado	Observaciones
Segadoras	3:1	Pendientes más planas, tractores de ruedas. Equipos especiales para pendientes mayores.
Pastoreo	2:1 o más plano	Para canales de más de 1.30 m de profundidad se deben utilizar trampas
Dragas	1:1	Generalmente en suelos muy estables donde el control de la vegetación no es posible a más de 1.30 m de profundidad.
Equipos de cuchillas	3:1	Son mejores las pendientes más suaves
Arados de vertedera	3:1	Son mejores las pendientes más suaves
Productos químicos	Cualquiera	Tener cuidado con cultivos
Quema	Cualquiera	-----

Fuente: Coras, 2000.



**Área del dren "A" (m<sup>2</sup>).** Se calcula con la siguiente fórmula presentada por Arteaga (1993):

$$A = db + zd^2 \quad \text{-----} \quad (2)$$

Donde:

b = base (m)

d = Tirante hidráulico (m)

z = Talud de la pared (adim.)

**Perímetro de mojado "P" (m).** Se calcula con la siguiente fórmula presentada por Arteaga (1993):

$$P = b + 2d\sqrt{z^2 + 1} \quad \text{-----} \quad (3)$$

Donde:

b = base (m)

d = Tirante hidráulico (m)

z = Talud de la pared (adim.)

**Radio hidráulico "R" (m).** Se calcula con la siguiente fórmula presentada por Arteaga (1993):

$$R = \frac{bd + zd^2}{b + 2d\sqrt{z^2 + 1}} \quad \text{-----} \quad (4)$$

Donde:

b = base (m)

d = Tirante hidráulico (m)

z = Talud de la pared (adim.)

**Libre bordo "E" (m).** Es recomendable usarse para secciones sin revestimiento en tanto no se tengan valores específicos (Arteaga, 1993).

$$E = 1/3d \quad \text{-----} \quad (5)$$

Donde:

d = Tirante hidráulico (m)

### Ejemplos

Estimación del caudal de diseño para el área de un proyecto. Ejemplo de aplicación del Método de la Curva Número adaptado por Rojas (1984) para drenaje superficial.

Consiste en realizar los siguientes cálculos:

- Tiempo de drenaje (td)
- Lluvia de diseño (Pd)
- Escorrentía de diseño (E)
- Caudal de diseño (Q)
- Capacidad de los colectores en las intersecciones

**Cálculo del tiempo de drenaje (td).** El tiempo de drenaje se calcula con la fórmula 6:

$$td = tt - t10 \quad \text{-----} \quad (6)$$

Donde:

tt = tiempo total de exceso de agua, (hr).

t10 = tiempo para que el suelo alcance un 10% de aireación (hr), que depende de la textura del suelo y se obtiene en el Cuadro 8.

A su vez, el valor de tt se calcula con la fórmula 7:

$$tt = Cc \times Dp^{0.46} \quad \text{-----} \quad (7)$$

Donde:

Cc = Coeficiente de cultivo (adim) y se obtiene en el Cuadro 9.

Dp = Daño permisible (%) y su valor se asume en un 10%.

**Cuadro 8. Tiempo (hr) para que el suelo recupere 8, 10 y 15% de aireación después de saturado, para diferentes clases texturales.**

Textura	t8	t10	t15
Arena	1.3	2.0	4.1
Arena fina	2.0	3.0	6.9
Franco arenoso	6.3	10.8	29.8
Franco	11.2	20.2	61.3
Franco limoso	19.3	36.7	122.2
Franco arcilloso arenoso	10.2	18.4	55.0
Franco arcilloso	9.5	16.9	49.9
Franco arcilloso limoso	18.4	34.9	115.4
Franco arenoso	4.4	7.3	19.0
Arcillo limoso	16.0	29.9	96.3
Arcilloso	31.9	63.6	230.8
Banco	9.8	17.6	52.2
Bajo	12.7	23.2	72.0

Fuente: Rojas, 1984.

**Cuadro 9. Coeficiente de cultivo Cc utilizado en el cálculo del tiempo total de exceso de agua tt.**

CULTIVO	Cc
Alfalfa	36.25
Algodón	13.93
Trébol	54.05
Cebolla	9.80
Garbanzo	24.77
Frijoles negros	3.74
Trébol ladino	38.31
Maíz	12.90
Girasol	12.26
Pasto braquiaria	125.52
Soya	33.02
Sorgo	12.51
Tabaco	5.93
Papa	10.32
Tomate	8.00
Zanahoria	11.48



Un ejemplo de datos de textura superficial de tres series de suelos, se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Textura superficial

Textura superficial	Serie de Suelo	Sup.(ha)	Sup. (%)
Franco arenosa	Palmar	349.24	22.0
Franco limosa	Cafetales	1,106.46	69.4
Franco Arcillo Arenosa	Limonos	136.56	8.6
	TOTAL	1.592.26	100.0

Considerando que existen varias texturas superficiales en el área del ejemplo, se calculará un valor ponderado para el parámetro  $t_{10}$  a obtener del Cuadro 8. Entonces, considerando los porcentajes de textura superficial en el área del ejemplo que son, Franco Arenosa 22.0%, Franco Limosa 69.4% y Franco Arcillo Arenosa 8.6% y ponderándolos para las diferentes texturas, se obtiene un valor de 29.4 hrs para  $t_{10}$ .

Para obtener el valor del Coeficiente de Cultivo  $C_c$  del Cuadro 9, se eligió el trébol ladino como ejemplo, cuyo valor de  $C_c$  de 38.31.

Por lo tanto, el valor de  $t_t$  es:

$$t_t = 38.31 \times (10)^{0.46} = 110.49 \text{ hrs}$$

Entonces, el valor de  $t_d$  es:

$$t_d = 110.49 - 29.4 = 81 \text{ hrs} = 3 \text{ días}$$

**Cálculo de la lluvia de diseño (Pd).** La lluvia de diseño depende de dos factores, el tiempo de drenaje y el período de retorno deseado. El tiempo de drenaje determina a su vez la duración de la lluvia de diseño.

El período de retorno se escoge de acuerdo al riesgo que se pueda correr, según criterios agro-económicos. El Soil Conservation Service de USA, recomienda un período de retorno de 5 años para obras de drenaje superficial, que es el seleccionado.

El valor de la duración de la lluvia de diseño para el ejemplo, corresponde al valor calculado de  $t_d$ , es decir 3 días y la lluvia de diseño  $P_d$  se obtiene de la estación meteorológica más cercana, que para el caso del ejemplo se utilizará el valor de 13.08 cm.

**Cálculo de escorrentía de diseño (E).** La escorrentía de diseño (E), es la lámina de exceso de agua superficial que se debe desalojar en el tiempo de drenaje  $t_d$ .

Para estimar la escorrentía, se utiliza el método del "Número de Curva" del Soil Conservation Service S.C.S. (1972), mediante la siguiente ecuación:

El valor de  $S$  se calcula mediante la ecuación:

$$E = \frac{(Pd - 0.2 \times S)^2}{(Pd + 0.8 \times S)} \quad (8)$$

Donde:

$P_d$  = Lluvia de diseño, (cm).

$S$  = Infiltración potencial, (cm).

El valor de  $S$  se calcula mediante la ecuación:

$$S = \left[ \frac{1000}{CN} \right] - 10 \times 2.54 \quad (9)$$

Donde:

$CN$  = Número de la Curva, (adim).

El valor de  $CN$  depende del uso del suelo o cubierta, del tratamiento o práctica del suelo, de la condición hidrológica que a su vez se obtiene del cuadro 11 y del tipo hidrológico del suelo.

Cuadro 11. Condición hidrológica para varios usos del suelo (CP, 1991).

Uso del suelo	Condición hidrológica
Pastos naturales	Pastos en condiciones malas, dispersos, fuertemente pastoreados con menos que la mitad del área total con cobertura vegetal. Pastos considerados con condiciones regulares, moderadamente pastoreados con la mitad o las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal. Pastos en buenas condiciones, ligeramente pastoreados y con más de las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal.
Áreas boscosas	Áreas en condiciones malas, tienen árboles dispersos y fuertemente pastoreados sin crecimiento rastroero. Áreas de condiciones regulares, son moderadamente pastoreadas y con algo de crecimiento. Áreas consideradas como buenas, están densamente pobladas y sin pastorear.
Pastizales mejorados	Pastizales mezclados con leguminosas sujetas a un cuidadoso sistema de manejo de pastoreo. Son considerados como de buenas condiciones hidrológicas.
Rotación de praderas	Praderas densas, moderadamente pastoreadas, usadas en una bien planeada rotación de cultivos y praderas, son consideradas como que están en buenas condiciones hidrológicas. Áreas con material disperso y sobrepastoreadas, son consideradas como malas condiciones hidrológicas.
Cultivos	Condiciones hidrológicas buenas se refieren a cultivos los cuales forman parte de una buena rotación de cultivos (cultivos de escarda, praderas, cultivos tupidos). Condiciones hidrológicas malas se refiere a cultivos manejados basándose en monocultivos.



Obteniendo estos datos se entra al Cuadro 12, en donde se presentan los valores de CN para diferentes condiciones.

**Cuadro 12. Curvas número (CN) para los complejos suelo-cobertura en cuencas en condición de humedad media (CP,1991).**

Uso del suelo o cubierta	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	Grupo de suelo Hidrológico			
			A	B	C	D
Barbecho	Surco recto	Mala	77	86	91	94
Cultivos en surcos	Surco recto	Mala	72	81	88	91
	Surco recto	Buena	67	78	85	89
	En contorno	Mala	70	79	84	88
	En contorno	Buena	65	75	82	86
	En contorno y terraceado	Mala	66	74	80	82
	En contorno y terraceado	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos y granos pequeños	Surco recto	Mala	65	76	84	88
	Surco recto	Buena	63	75	83	87
	En contorno	Mala	63	74	82	85
	En contorno	Buena	61	73	81	84
	En contorno y terraceado	Mala	61	72	79	82
	En contorno y terraceado	Buena	59	70	78	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación de siembra densa	Surco recto	Mala	66	77	85	89
	Surco recto	Buena	58	72	81	85
	En contorno	Mala	64	75	83	85
	En contorno	Buena	55	69	78	83
	En contorno y terraceado	Mala	63	73	80	83
	En contorno y terraceado	Buena	51	67	76	80
Praderas o pastizales	Sin tratam	Mala	68	79	86	89
	Sin tratam	Aceptable	49	69	79	84
	Sin tratam	Buena	39	61	74	80
	En contorno	Mala	47	67	81	88
	En contorno	Aceptable	25	59	75	83
	En contorno	Buena	6	35	70	79
Praderas (permanente)		Buena	30	58	71	78
Bosques		Mala	45	66	77	83
		Aceptable	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Parques, patios			59	74	82	86
Caminos de tierra			72	82	87	89
Caminos de superficie dura			74	84	90	92

Para el ejemplo, se consideraron los siguientes datos:

- Uso del suelo: pastizales para pastoreo.
- Tratamiento: no tienen.
- Condición Hidrológica: prácticamente casi el 100% del área tiene cobertura vegetal por lo que la es catalogada como buena (Cuadro 11).
- Tipo Hidrológico: Para el ejemplo se clasificaron los suelos como del D (alto potencial de escorrentía).

Con esta información se entra al Cuadro 12.

Así, el valor de la Curva Número CN para los datos de ejemplo resulta que es 80.

Con el valor de CN, se calculó la infiltración potencial S (Ecuación 9):

$$S = [(1000 \text{ CN}) - 10] \times 2.54 = 6.35 \text{ cm}$$

Con el valor de S y de Pd se obtiene la Escorrentía de diseño E (Ecuación 8).

$$E = \frac{(13.08 - 0.2 \times 6.35)^2}{(13.08 + 0.8 \times 6.35)} = 7.68 \text{ cm}$$

**Cálculo del caudal de diseño (Q).** El caudal de diseño se calcula mediante la Ecuación del Cypress Creek (Palacios, 2002):

$$Q = C \times A^p \quad \text{----- (10)}$$

Donde:

C= Coeficiente de drenaje (l/s/ha)

A= Área a drenar (ha)

p = exponente empírico, usualmente 5/6.

La fórmula anterior presenta la conveniencia de incorporar el efecto del aumento del área a drenar en el valor final del caudal de diseño.

El Coeficiente C de drenaje, se obtiene de una ecuación propuesta por Stephen y Mills (1965):

$$C = 4.573 + 1.62 \times E_{24} \text{----- (11)}$$

Donde:

E<sub>24</sub> = Escorrentía de diseño para 24 hrs (cm)

<sup>24</sup>

A su vez, E<sub>24</sub> es calculada mediante:

$$E_{24} = \frac{E * 24}{td} \text{----- (12)}$$

Donde:

E = Escorrentía diseño, (cm).

td =Tiempo de drenaje, (hr).



Con los valores del ejemplo de E y td, se obtiene el valor de  $E_{24}$ :

$$E_{24} = (7.68 \text{ cm} \times 24)^{0.72} = 2.56 \text{ cm}$$

Siendo el valor del coeficiente de drenaje C:

$$C = 4.573 + 1.62 \times 2.56 = 8.7 \text{ (l/s/ha)}$$

El área de las cuencas de los cauces del área del ejemplo es de 1,592.26 ha.

Por lo tanto, para el área del ejemplo se obtiene el siguiente valor de caudal total a desalojar:

$$Q = 8.7 \times (1,592.26)^{\%} = 4,053.82 \text{ l/s}$$

**Cálculo de la capacidad de los colectores en las intersecciones.** Según Rojas (1976), la determinación del gasto que pasará por un dren colector aguas abajo de una intersección, puede realizarse en dos formas:

- Sumando las capacidades de los colectores que se unen. Este método da una capacidad mayor que la que se describe en el siguiente inciso, debiendo utilizarse, cuando las áreas drenadas por los colectores son casi iguales. Esto es debido a que los tiempos de concentración serán aproximadamente iguales.
- Considerando todo el área de la cuenca aguas arriba de la intersección y utilizar un coeficiente de drenaje ponderado (en caso de que sean diferentes). Este método será utilizado cuando un cauce que drena una pequeña área se une a otro colector de área de aportación mucho mayor. En los casos intermedios se puede utilizar una combinación de ambos métodos.

El Soil Conservation Service recomienda el siguiente procedimiento llamado Regla 20-40.

**Caso 1.** Cuando el área tributaria de uno de los colectores está entre 40 y 50 por ciento del área total, la capacidad del dren aguas abajo de la intersección, se determina sumando las capacidades de ambos colectores antes de la unión.

**Caso 2.** Cuando el área tributaria de un colector es menor al 20 por ciento del área total, la capacidad del colector se obtiene sumando ambas áreas y utilizando un coeficiente de drenaje ponderado (área equivalente), para toda el área.

**Caso 3.** En el caso de que el área drenada por uno de los laterales esté en el rango de 20 a 40 por ciento del área total, el gasto total puede ser obtenido a partir de la descarga menor obtenida por el método (1), al 20% y proporcionado a la descarga mayor obtenida por el método (2) al 40%. De

esa forma el cálculo se hace mediante el cómputo de los caudales por ambos casos (1 y 2) y obteniendo la diferencia entre esos dos valores; entonces se hace una interpolación utilizando el valor real del porcentaje del área del lateral en cuestión.

**Cálculo de áreas equivalentes (Ae).** Cuando el exceso de agua es removida a diferentes cantidades en varias partes de una cuenca, es necesario transformar los datos en áreas equivalentes o en caudales equivalentes, de manera que los cálculos puedan llevarse a cabo sin ninguna confusión.

La mejor forma de realizar estos cálculos, es mediante una recopilación de diferentes coeficientes de drenaje basados en el área total de cada sub-área, en vez de utilizar coeficientes por unidad de área. Las diferentes curvas se grafican para facilitar el cálculo.

### Espaciamiento entre drenes parcelarios subterráneos (Fórmula de Hooghoudt).

Existen varias fórmulas empíricas para calcular el espaciamiento entre drenes subterráneos, que dependen del régimen de recarga de los mantos freáticos superficiales, ya sea permanente o establecido o no permanente o no establecido.

Para el caso de la presente ficha que se refiere al drenaje de zonas lluviosas, en las que existe un equilibrio dinámico debido a que la misma cantidad de agua que ingresa es la misma que sale, se utilizan los conceptos de régimen permanente, cuya fórmula de Hooghoudt es la siguiente (Figura 6, Quiroga 2007):

$$L^2 = \left( \frac{8kb \cdot De \cdot H}{q} \right) + \left( \frac{4Ka \cdot H^2}{q} \right) \quad \text{--- (13)}$$

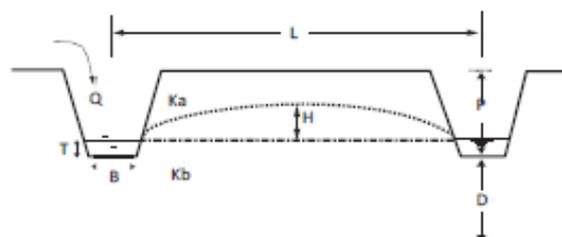


Figura 6. Parámetros de un sistema de drenaje

Donde:

L = Separación entre drenes, m

Ka = Conductividad hidráulica por encima del nivel del dren, m/día

Kb = Conductividad hidráulica por abajo del nivel del dren, m/día



H = Altura del nivel freático del piso al dren, m  
De = Profundidad equivalente, m, que es igual a:

$$De = \frac{D}{((2.55 * \frac{D}{L1}) * (\ln(\frac{D}{Pm})) + 1)} \quad (14)$$

q = Coeficiente de drenaje, m/día, que es igual

$$q = LD - (1 - C) * I - ETP \quad (15)$$

Donde:

D = Profundidad o distancia del hidroapoyo al fondo del dren, m

L1 = Distancia estimada entre drenes, m

C = Coeficiente de escorrentía del método racional (adim.)

LD = Lluvia de diseño, m/día

I = Intensidad de la lluvia, m/día

ETP = Evapotranspiración, m/día

Pm = Perímetro de mojado del dren, m, que es igual a:

$$Pm = B + 2 * T * (1 + m^2)^{1/2} \quad (16)$$

Donde:

B = Base del canal, m

T = Tirante de agua, m

m = Talud del canal

La profundidad de los drenes (P), se define en base a la profundidad del sistema radical del cultivo de la parcela a drenar.

La conductividad hidráulica del suelo (Ka y Kb), está relacionada con la textura y estructura del suelo y puede ser obtenido en campo o laboratorio. También puede ser estimado utilizando el Cuadro 13 (Quiroga, 2007):

**Cuadro 13. Conductividad hidráulica de algunas clases texturales de suelo.**

Textura	K (m/ día)
Franco arenosa	3.0
Franco	1.5
Franco limoso	1.2
Franco arcilloso	0.5

Fuente: Martínez, 1986.

**Ejemplo de aplicación de la ecuación de Hooghoudt.** La resolución de la ecuación de Hooghoudt en su expresión más general, requiere de un cálculo iterativo.

Inicialmente se asume un valor de (L1) arbitrario para un

dren de cierto perímetro mojado (Pm), calculándose a continuación el espesor del estrato equivalente (De) con la Ecuación 14. Este valor se introduce en la Ecuaciones 13

para determinar el espaciamiento (L). Si el valor obtenido se diferencia apreciablemente del valor supuesto, se repite el procedimiento con el nuevo valor encontrado para (L) y así sucesivamente, hasta obtener valores suficientemente cercanos de (L). Tras varios tanteos el valor de (L) calculado debe ser igual al supuesto.

Como ejemplo de aplicación, se va a considerar a un suelo con los siguientes datos:

- La profundidad del dren (P), es de 1.25 m
- La base del dren (B) es de 0.30 m
- El Tirante de agua (T) es de 0.05 m
- El Talud del dren (m) es de 0.5
- La capa impermeable está situada a 7.0 m de profundidad (P+D)
- Por lo tanto, la profundidad o distancia del hidroapoyo al fondo del dren (D), es de 5.75
- El primer valor que se asigna de distancia entre drenes (L1) para el proceso iterativo, es de 40 m
- La altura (H) del nivel freático es de 0.15 m
- Para la lluvia de diseño (LD), se utiliza como dato que la máxima precipitación pluvial para un tiempo de retorno de 5 años es de 500 mm/día o 0.5 m/día o 0.021 m/hr.
- El Coeficiente de escorrentía (C), del método racional, seleccionado para este caso, es de 0.5
- La Intensidad de la lluvia (I) es LD/24 = 0.021 m/hr
- La evapotranspiración diaria (ETP) es de 3.76 mm/día o 0.00376 m/día

Se procede hacer los cálculos con las Ecuaciones 13, 14, 15 y 16:

$$Pm = B + 2 * T * (1 + m^2)^{1/2}$$

$$Pm = 0.3 + 2 * 0.05 * (1 + 0.5^2)^{1/2} = 0.412 \text{ m}$$

$$De = \frac{D}{((2.55 * \frac{D}{L1}) * (\ln(\frac{D}{Pm})) + 1)}$$

$$= \frac{5.75}{((2.55 * \frac{5.75}{40}) * (\ln(\frac{5.75}{0.412})) + 1)} = 2.92 \text{ m}$$

$$q = LD - (1 - C) * I - ETP =$$

$$0.021 - (1 - 0.5) * 0.021 - 0.00376 = 0.0067$$

$$L^2 = \frac{(8kb * De + H^2)}{4q} + \frac{(4Ka * H^2)}{4q}$$

$$= \frac{(8 * 1.2 * 2.92 + 0.15^2 / 0.0067)}{4} + \frac{(4 * 1.2 * 0.15^2 / 0.0067)}{4}$$

$$= 641 \text{ m}$$

$$L = 25.3 \text{ m}$$



Si se continua con el proceso asignando un segundo valor a L1 de 25 m, el segundo valor de L es de 22.3 y así sucesivamente hasta encontrar el valor de L1 de 21.3 m que coincida con el de L igual también a 21.3 m (Cuadro 14).

Para ejemplificar el procedimiento con otros datos distintos de profundidad de drenes, profundidad del hidroapoyo y conductividad hidráulica del suelo, en el Cuadro 14 se presentan resultados obtenidos con dicho proceso iterativo, manteniendo constantes los siguientes valores:

- (B) de 0.3 m
- (T) de 0.05 m
- (LD) de 0.021 m/hr
- (C) de 0.5
- (I) de 0.021 m/hr
- (ETP) de 0.00376 m/día
- (H) de 0.15 m

**Cuadro 14. Espaciamientos entre drenes para diferentes valores de profundidad de dren (P) y conductividades hidráulicas del suelo (Ka y Kb).**

P	p+D	Pm	D	L1	De	Ka	Kb	q	L <sup>2</sup>	L
1.25	7.0	0.412	5.75	40.0	2.92	1.2	1.2	0.0067	641	25.3
1.25	7.0	0.412	5.75	25.0	2.26	1.2	1.2	0.0067	498	22.3
1.25	7.0	0.412	5.75	21.3	2.04	1.2	1.2	0.0067	452	21.3
1.50	6.0	0.412	4.50	40.0	2.67	1.2	1.2	0.0067	586	24.2
1.50	6.0	0.412	4.50	25.0	2.15	1.2	1.2	0.0067	474	21.8
1.50	6.0	0.412	4.50	20.7	1.93	1.2	1.2	0.0067	429	20.7
1.75	5.0	0.412	3.25	40.0	2.28	1.2	1.2	0.0067	502	22.4
1.75	5.0	0.412	3.25	22.0	1.83	1.2	1.2	0.0067	407	20.2
1.75	5.0	0.412	3.25	19.7	1.74	1.2	1.2	0.0067	388	19.7
1.50	4.0	0.412	2.50	40.0	1.94	2.5	2.5	0.0067	898	30.0
1.50	4.0	0.412	2.50	30.0	1.81	2.5	2.5	0.0067	838	28.9
1.50	4.0	0.412	2.50	28.8	1.79	2.5	2.5	0.0067	829	28.8

Fuente: Obtenidos por el autor.

Para complementar la información, en el Cuadro 15 se presentan algunos datos de profundidades y espaciamientos de drenes más comunes en suelos no diferenciados.

**Cuadro 15. Profundidades y espaciamientos de drenes, más comunes en suelos no diferenciados**

SUELO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Arcilloso	10 - 17	1.00 - 1.15
Arcillo limoso	13 - 13	1.00 - 1.15
Franco Limoso	20 - 33	1.15 - 1.30
Franco arenoso	33 - 40	1.30 - 1.50
Arenoso franco	33 - 67	1.30 - 1.65
Suelos Irrigados	50 - 200	1.65 - 2.65

**Métodos para calcular los gastos de diseño hidráulico para drenaje en general.** En el apartado 6.1.4 se usó la ecuación de Cypress Creek para el cálculo del gasto en drenes de aguas superficiales, sin embargo, de manera general, la mayoría de los procedimientos para calcular escurrimiento han sido diseñados para estimar las crecidas máximas o avenidas máximas. Entre los métodos se tienen el de envolventes máximas, el racional y el racional modificado:

**Método de envolventes.** Este método toma en cuenta sólo el área de la cuenca. Aunque no son métodos que analicen propiamente la relación entre la lluvia y el escurrimiento, pueden ser de gran utilidad en los casos en que se requieran sólo estimaciones gruesas de los gastos máximos probables, o bien, cuando se carezca casi por completo de información.

**Método racional.** Dentro de la importancia de los escurrimientos, se considera la estimación de ellos para la planeación de obras de manejo de los recursos hidráulicos y para su aprovechamiento en áreas de riego.

El escurrimiento máximo de un área de drenaje es esencial para el diseño de estructuras vertedoras y de almacenamiento, por tal razón es necesario estimarlos, para ello se usan formulas empíricas como el método racional, el cual se expresa por la ecuación.

$$Q_s = 0.0028CIA \quad \text{----- (17)}$$

Donde:

Q<sub>s</sub> = Gasto máximo probable de escurrimiento en m<sup>3</sup>/s.

C = coeficiente de escurrimiento, que varía de 0.1 a 1, el cual depende de las características de la cuenca, es adimensional

I = Intensidad de la lluvia expresada en mm/h.

A = Área de la cuenca, en ha.

0.0028 = Coeficiente de conversión de unidades, resultante de cambiar mm y hectáreas a m<sup>2</sup>, y horas a segundos.

El Coeficiente de escurrimiento es la proporción de lluvia que fluye superficialmente sobre el terreno como escorrentía. Depende entre otros factores, de la pendiente, del tipo de suelo, de la cubierta vegetal, de la humedad del suelo previa a la lluvia, así como de la intensidad y duración de la lluvia.

**Método racional modificado.** Los excesos de la precipitación máximos en cuencas pequeñas también pueden ser estimados por el método racional modificado. Este método puede ser utilizado cuando existen datos pluviográficos de



una estación dentro o cerca del área de estudio, utilizando la fórmula 32 (Colegio de Postgraduados, 1991).

$$Q = 0.0028 CPA \quad \text{-----} \quad (18)$$

Donde:

Q = Escurrimiento máximo, en m<sup>3</sup>/s

C = Coeficiente de escurrimiento, que varía de 0.1 a 1, de acuerdo con las características propias de la cuenca (Cuadro 16).

P = Lluvia de diseño para un período de retorno dado, en mm.

A = Área de la cuenca, en ha.

Es importante considerar que para un período crítico, la lluvia reportada en 24 horas se puede presentar en una hora, por lo que este valor se debe expresar en cm/hora.

**Cuadro 16. Valores de C para el cálculo de escurrimientos.**

Topografía Vegetación	Textura del Suelo		
	Gruesa	Media	Fina
<b>Bosque</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
<b>Pastizales</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
<b>Terrenos Cultivados</b>			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

Fuente: Colegio de Postgraduados, 1991

#### Procedimientos para su implementación

Los procedimientos que en la práctica son los más utilizados, son:

#### Para drenes a cielo abierto:

- Trazo
- Excavación
- Retiro y acomodo de materiales
- Construcción de estructuras o
  - o De protección
  - o De aforo
  - o De acceso y tránsito
  - o Rejillas coladeras y registros

#### Para drenaje subterráneo:

- Trazo
- Excavación
- Colocación de la tubería
- Colocación de las conexiones de la tubería y señalamientos externos
- Enterrado de la tubería y acomodo de materiales
- Construcción de estructuras o
  - o De protección a la tubería
  - o De aforo
  - o Rejillas coladeras y registros

#### Equipo para su construcción

Dado que el estudio de la maquinaria utilizada para la construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de drenaje es muy amplio y detallado, solo se mencionan los tipos de maquinaria que en la práctica son los más utilizados.

#### Drenes a cielo abierto.

##### a. Maquinaria pesada:

- Zanjeadora múltiple (Extractora y desparramadora del material)
- Dragas
- Excavadoras
- Zanjeadoras
- Tractores de Empuje y de Levante
- Motoconformadoras
- Camiones de Volteo

##### b. Equipo ligero y mediano:

- Retroexcavadoras y Traxcavos montados a tractor agrícola
- Equipo ligero con implementos como cincel y cucharón

#### Drenes entubados.

##### a. Maquinaria pesada:

- Zanjadoras:
- De cincel
- De cadena
- De disco rotatorio
- Motoconformadora

##### b. Equipo ligero y mediano:

- Escrepas autopropulsadas



**Fortalecimiento de la capacidad institucional en los sectores de desarrollo integral con coca, tráfico ilícito de drogas y seguridad alimentaria para una eficiente gestión del apoyo presupuestario sectorial – Contrato n° DCI/LA/2017/392-699**



- Emparejadora
- Niveladora
- Cucharones
- Equipo rayo láser y remolque de los rollos de plástico