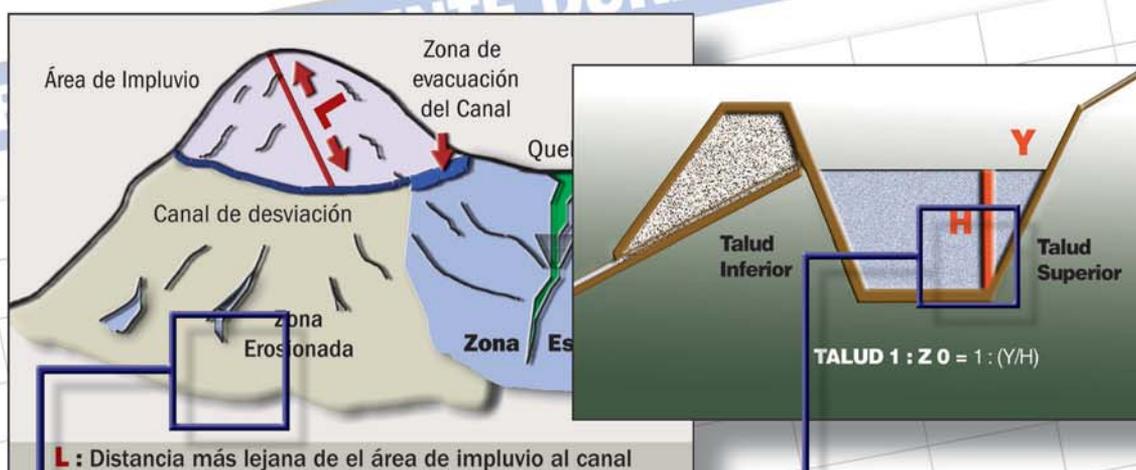




GOBIERNO DE CHILE

Manual para el desarrollo de Obras de conservación de Suelo

Canal de Desviación - Sistema de Zanja de Infiltración



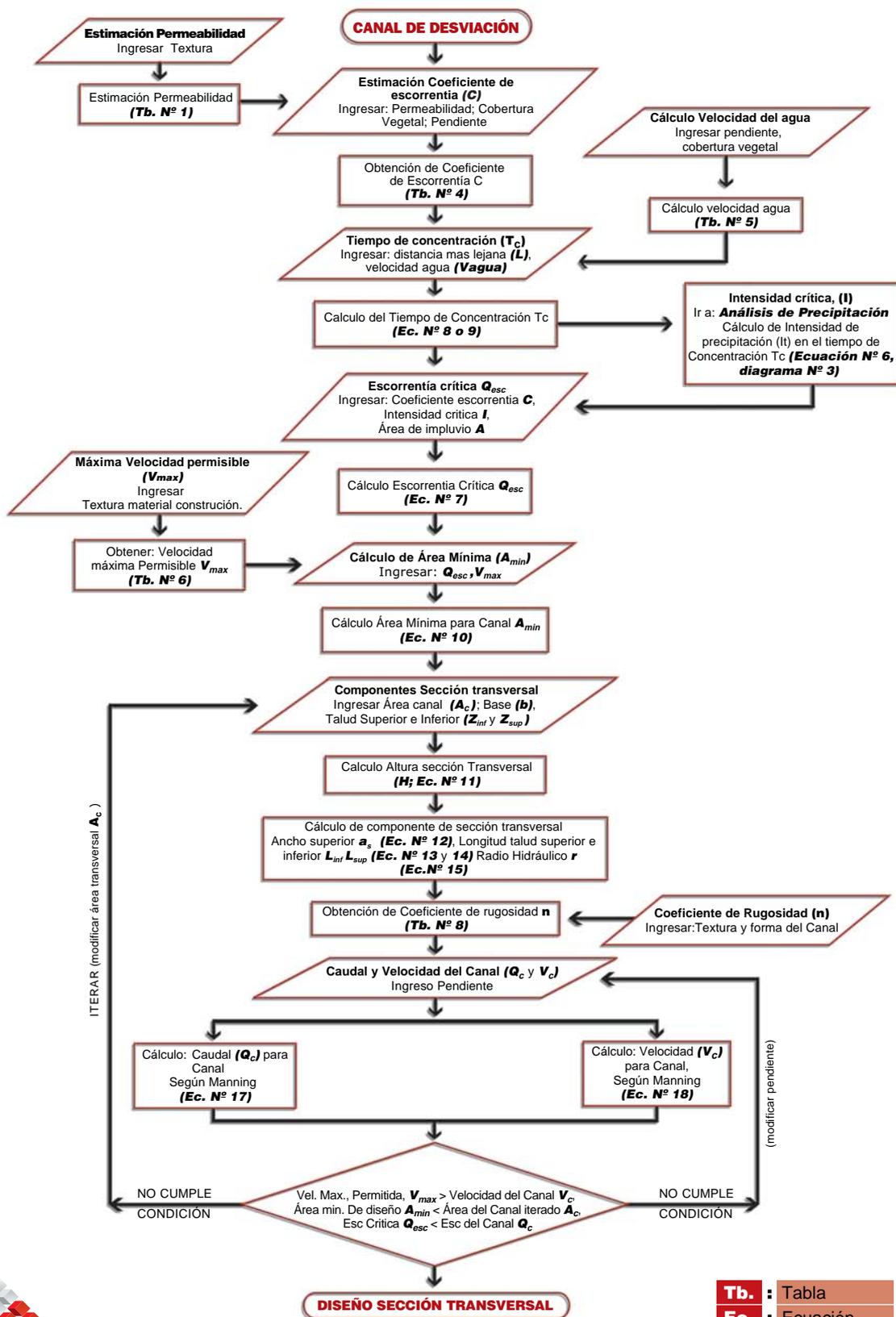
AUTORES:

Mauricio Lemus V.
Ingenieros Forestal

Guillermo Navarro V.
Ingenio Forestal

San Fernando, Marzo 2003

CORPORACION NACIONAL FORESTAL



- Tb.** : Tabla
- Ec.** : Ecuación
- Fig.** : Figura

1. INTRODUCCIÓN

La Ley de Fomento Forestal D.L. 701 bonifica la forestación y las actividades de recuperación y conservación de suelos. Estas últimas, con el objeto de mitigar y/o controlar la escorrentía superficial, principal causante de la erosión hídrica. El presente documento desarrolla una metodología de diseño de dos tipos de obras para laderas, canales de desviación de aguas y zanjas de infiltración, como apoyo para profesionales que, sin ser expertos en hidrología, puedan desarrollar un diseño técnico de las obras descritas, utilizando datos accesibles de obtener en terreno y recopilando la escasa información disponible de precipitaciones de la estación meteorológica más cercana del sector a tratar. Del punto de vista costo-beneficio, estas obras seleccionadas son de fácil construcción y bajo costo, en mano de obra e insumos. Por otra parte, las zanjas de infiltración son, específicamente, obras por excelencia captadoras de aguas lluvias, que implementadas en sectores con plantaciones forestales, benefician directamente con una mayor disponibilidad hídrica a dichos recursos.

Para facilitar la aplicación metodológica, se desarrolló un software, de diseño de canales y zanjas de infiltración, como herramienta técnica de fácil operatividad, adjunto a este documento.

2. ANTECEDENTES GENERALES A CONSIDERAR

Un buen diagnóstico del problema, toma de datos en terreno, correcto desarrollo metodológico de diseño y uso posterior de los resultados, requiere conocer más en profundidad los factores causantes de la erosión y su proceso. Un sistema de tratamientos de conservación no puede ser generalizado. Necesita del estudio de caso en particular. Según López et al (1994), son un conjunto de principios y técnicas que por separado difícilmente cumplen el objetivo deseado. En consecuencia, cada medida, en general, y cada una, en particular, están condicionadas por una serie de parámetros: climáticos, geomorfológicos, edafológicos, agronómicos e hidrológicos.

2.1 EROSIÓN

Proceso físico de remoción acelerada de partículas de suelos producidos por el agua, viento, glaciar es o acción geológica y/o generada por la acción antrópica.

Factores que intervienen en la Erosión:

En el caso de la erosión hídrica se considera que las precipitaciones, relieve (en especial, pendiente en cuanto a longitud y grado), características edáficas (textura, estructura, permeabilidad, contenido de materia orgánica, entre otras) y cobertura vegetal son los factores que inciden directamente en la erosión de los suelos, cada

uno actuando de manera particular de la siguiente manera:

· **Precipitaciones:** Factor climático relevante en causar la erosión de los suelos (Peralta, 1976). Cuando la cantidad de agua de lluvia excede a la capacidad de absorción o infiltración, el agua de exceso fluye sobre la superficie, fenómeno denominado **escorrentía superficial** (López et al, 1994), que en conjunto con el efecto de la gota de lluvia generan la erosión. Los factores que intervienen en la escorrentía son la cantidad, intensidad y duración de las lluvias, además de la distribución de las precipitaciones respecto del tiempo, lo cual determina las condiciones precedentes de humedad del suelo. De éstos, el factor pluviométrico más importante que afecta la escorrentía y, por ende, a la erosión es la intensidad (Peralta, 1976). Por ejemplo, dos zonas que en un período de tiempo tengan precipitación total semejante, pero que en un sector se distribuye de forma homogénea y en el otro, en reducidos e *intensos* eventos pluviométricos, es de esperar que en el segundo caso se presenten procesos erosivos de mayor magnitud. Además, el suelo está más expuesto a la acción erosiva del agua, debido a que el desarrollo de la vegetación es menos exuberante que el primer caso, con precipitaciones en período de tiempo mayor.

· **Cobertura vegetal:** La importancia de este factor radica en la protección física que otorga al suelo, por medio de la interceptación directa de la precipitación, o a través de la hojarasca, que protege al suelo del impacto de la gota de lluvia y su rugosidad sobre la escorrentía superficial. Además, mejora las características edáficas, proporcionando mayor sustento a través del sistema radicular y modificando propiedades de los suelos como estructura y permeabilidad, entre otras, todas propiedades del suelo que inciden en la resistencia que éste ofrece a ser erosionado.

· **Relieve:** Factor con efecto directo sobre la erosión, tanto del micro como del macrorrelieve, destacando especialmente la característica del macrorrelieve, **pendiente del terreno**, preponderante en el desarrollo de la erosión. Tanto la velocidad como la energía erosiva de la escorrentía superficial se ven fuertemente afectadas por la inclinación, como por la longitud de la pendiente. Suárez de Castro (1979) explica en forma teórica las relaciones entre la pendiente y la magnitud de la velocidad del agua y su correspondiente poder erosivo de la siguiente forma:

1. *La velocidad varía con la raíz cuadrada de la distancia vertical (longitud e inclinación) que ella recorre y su capacidad erosiva, de acuerdo con el cuadrado de la velocidad. Es decir, si la pendiente del*

- terreno se aumenta cuatro veces, la velocidad del agua que fluye sobre él se duplica y su capacidad erosiva se cuadruplica.
2. La cantidad de material de determinado tamaño que puede arrastrar varía con la quinta potencia de la velocidad del flujo.
 3. El tamaño de las partículas que pueden transportarse por rodamiento varía con la sexta potencia de la velocidad del agua. De manera que si se duplica la velocidad de la escorrentía, la cantidad de material de determinado tamaño que puede transportarse aumenta 32 veces y el tamaño de las partículas que pueden transportarse por rodamientos aumenta 64 veces.

Conceptos que muestran la importancia de la distancia vertical de la pendiente (longitud y grado) sobre la erosión, como también la relevancia de poder reducir cualquiera de estas características, por mitiando la depositación de partículas de suelo desplazada por la acción del agua.

- **Suelo:** Sus características tanto físicas como químicas determinan su capacidad de infiltrar y retener agua, como su resistencia a la acción erosiva del agua (erodabilidad). De ahí la importancia de conocer características como textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad, entre otras.

2.2 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

El diagnóstico requiere el desarrollo de los siguientes puntos:

1.- Determinar la superficie degradada a mitigar, definir categorías de erosión e identificar causas y problemas; escorrentía superficial, flujos hídricos del cauce o de la cárcava, etc. **Criterios indispensables**, para la selección de las obras a utilizar.

2.- Toma de datos de terreno y recopilación de antecedentes pluviométricos para el diseño de obras de conservación:

En forma práctica, este análisis se ve afectado por condicionantes de tipo económico y técnico-legal, como son: disponibilidad financiera, normativa vigente (número de obras, dimensión y distribución espacial, D.L. 701) y capacidad de gestión del propietario.

2.2.1 CATEGORÍA EROSIÓN

Se podrán identificar el o los grados de erosión presentes en la zona a mitigar, zonificando por áreas homogéneas.

A partir de criterios técnicos, expuestos en el **artículo 21° de las disposiciones de las**

normas técnicas reglamentarias del D.L.701 (Francke et al, 1999).

2.2.2 Antecedentes pluviométricos

Siendo las precipitaciones las que más influyen en la ocurrencia de la erosión, el diseño de obras estará directamente relacionado con las magnitudes e intensidades que éstas presenten en el sector a tratar. La información básica a utilizar es: registro anual de las precipitaciones máximas en 24 horas, de una serie no inferior a 5 años y 10 o más años como óptimo (menor número de datos implica menor precisión en las estimaciones estadísticas), de la estación meteorológica más cercana y representativa del sector. A partir de esta información, por medio de la **distribución de Gumbel** (Monsalve, 1999) y de la metodología propuesta por **Espíldora** (Espíldora, 1971) podrán ser inferidos los valores de intensidad y magnitud de precipitación, en períodos de tiempo pequeños (menores a 24 horas, generalmente menor o igual a 1 hora), datos indispensables en el dimensionamiento de las obras.

2.2.3 TOMA DE DATOS EN TERRENO

Para el diseño de las obras (canales de desviación y zanjas de infiltración), es indispensable tomar en terreno los siguientes datos característicos del lugar a mitigar.

Suelo: Respecto a este factor debemos obtener los siguientes datos: **textura, permeabilidad**, además de la **rugosidad** (Tabla Nº 8) que presentará el canal. La permeabilidad podrá ser obtenida en forma indirecta por medio de la textura (Tabla Nº 1) o mediante observación directa de terreno.

TABLA Nº 1. Estimación de la permeabilidad a partir de la textura

TEXTURA	MÍNIMA TASA DE INFILTRACIÓN*	PERMEABILIDAD
ARENOSA, ARENOSO FRANCO	7.62 - 11.43 MM/HR	MUY PERMEABLE
FRANCO ARENOSO, FRANCO, FRANCO LIMOSO, FRANCO ARCILLOSO	1.27 - 7.62 MM/HR	SEMIPERMEABLE
ARCILLOSO	0 - 1.27 MM /HR	IMPERMEABLE

* ADAPTADO DE MARTÍNEZ (1996).

La estimación de la permeabilidad a través de la tabla no reemplaza la observación en terreno, ya que factor es tal como presencia de estratas duras en el horizonte del suelo alterarán la permeabilidad.



Relieve-Área de mitigación: Se requiere la **pendiente, área de impluvio** (superficie cuyas aguas vierten sobre el canal) y la **distancia más lejana del área de recepción** hacia el canal de desviación.

Cobertura Vegetal: Se debe caracterizar que tipo de cubierta vegetal tiene el área a tratar (pastizal, matorral, bosque).

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN Y CANALES DE DESVIACIÓN DE AGUA

Existen obras de conservación de suelo que aumentan la infiltración, como las zanjias y otras que regulan el flujo hídrico como son los canales de desviación (Francke et al, 1999). El diseño de estas obras necesita del análisis de precipitaciones, que estime magnitudes e intensidades de precipitaciones en períodos de tiempos pequeños que inciden directamente en la dimensión de las obras a construir. Con esta información y el detalle de los datos de terreno se determina la escorrentía que deberá controlar cada obra de conservación, **escorrentía crítica**, teniéndose que diseñar de esta manera un canal de desviación o zanja de infiltración capaz de trasladarla o retenerla en parte.

3.1 ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

La gran escasez de datos pluviométricos disponibles para cada localidad de nuestro país hace necesario métodos analíticos de estimación. En especial sobre intensidades o magnitudes de lluvia para duraciones pequeñas.

La información pluviométrica puede ser expresada de dos formas. Según Espíldora (1979): **magnitud de lluvia**, lámina de agua (mm) que se produce en un cierto intervalo de tiempo o duración; o **intensidad**, lámina de agua por hora (mm/hr). Por ejemplo, es posible expresar la magnitud de lluvia de 10.36 mm en 10 min. en términos de intensidad, que es igual a 62.16 mm/hr.:

$$I_t = \left\{ \frac{P_{pt_{min}}}{t_{min/60}} \right\} = \left\{ \frac{10.36 \text{ mm}}{10 \text{ min}/60 \text{ min}} \right\} = 62.16 \text{ mm/hr}$$

I_t	= Intensidad en un tiempo t (mm/hr)
P_p	= Precipitación en t min (mm)
t	= tiempo t min

3.1.1 ANÁLISIS DE FRECUENCIA

El dimensionamiento de obras de conservación de suelo debe estar asociado a un período de duración, considerando que las obras están insertas en áreas forestadas. Su vida útil debe ser no inferior al período en el cual la plantación alcanza una cobertura protectora contra la acción erosiva del agua lluvia. Millán (2000) recomienda dimensionar las obras para un período de retorno de 10 años, entendiéndose **período de**

retorno como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual cierta magnitud o intensidad de lluvia se iguala o excede una vez. Cabe mencionar que el valor recíproco del período de retorno es la **probabilidad de excedencia**. Es decir, la probabilidad anual de igualar o sobrepasar cierta magnitud del fenómeno en estudio. Por ejemplo, una zona con una precipitación máxima en 24 horas de 100 mm, con período de retorno de 10 años, significa que cada 10 años se espera la ocurrencia de una lluvia igual o superior. Por otra parte, existe la probabilidad de excedencia de un 10% anual, que se pueda igualar o exceder en 24 horas los 100 mm.

Para el análisis de precipitaciones, la información básica es un registro anual de máximas precipitaciones en 24 horas ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$), valores de entrada para el estudio de lluvias asociadas a un período de retorno, utilizándose la distribución de **valores extremos o Gumbel**, comúnmente usada para análisis de frecuencia de variables hidrológicas (Monsalve, 1999). Por ejemplo, López et al. (1994) propone utilizar esta distribución en la estimación de caudales máximos, con período de retorno asociado.

La distribución de Gumbel, según Millán (2000), tiene la siguiente función de distribución de probabilidad:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

y, por lo tanto, la función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-(\alpha-\beta)}]}$$

En directa relación con el **análisis de frecuencia** se encuentra el cálculo de los valores α y β , los cuales se obtienen a partir del registro de valores de precipitaciones. En primer término se obtienen los valores de μ_y y σ_y de tabla, según el número de registro de precipitaciones (Tabla N°2). Con estos valores, además del promedio (\bar{x}) y desviación estándar (s) de las máximas precipitaciones anuales, se obtienen los valores de α y β luego de reemplazarlos en las Ecuaciones N° 1 y 2,

TABLA N° 2. Valores μ_y y σ_y para el cálculo de parámetros α , β de la función de Gumbel (Según Monsalve, 1999)

n-1 años	μ_y	σ_y	n-1 años	μ_y	σ_y
2	0.4043	0.4984	9	0.4902	0.9288
3	0.4286	0.6435	10	0.4952	0.9497
4	0.4458	0.7315	11	0.4996	0.9676
5	0.4588	0.7928	12	0.5035	0.9833
6	0.469	0.8388	13	0.507	0.9972
7	0.4774	0.8749	14	0.51	1.0095
8	0.4843	0.9043	15	0.5128	1.0206

Ecuación N° 1 y 2 Cálculo de parámetros función de Gumbel (Millan et al, 2000)

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s} ; \beta = x - \frac{\mu_y}{\alpha}$$

En donde:

- x** : Promedio de precipitaciones en 24 horas (mm).
- s** : Desviación estándar de precipitaciones en 24 horas.
- n** : Número de registro (pp máximas en 24 horas).

Obtenidos los parámetros α y β es posible calcular las precipitaciones máximas en 24 horas (P_{max}) para un período de retorno R, a partir de la siguiente fórmula:

Ecuación N°3. Cálculo de precipitación máxima (Millan et al, 2000)

$$P_{max} = \beta - \left(\frac{1}{\alpha}\right) * \ln \left[\ln \left(\frac{R}{R-1} \right) \right]$$

- P_{max}** : Precipitación máxima en 24 horas asociado a un período de retorno R.
- R** : Período de retorno.
- α, β** : Parámetros de cálculo (Ecuación N° 1 y 2)

Siendo P_{max} el valor de entrada para la obtención de valores de magnitud e intensidad de precipitaciones.

3.1.2 Análisis de magnitudes e intensidades de lluvia para duraciones pequeñas

Es necesaria la estimación de valores de magnitudes e intensidades en períodos cortos de tiempo (generalmente igual o menor a 1 hora), por cuanto inciden directamente en el aporte máximo de escorrentía que deberán soportar las obras de conservación de suelo.

3.1.2.1 Coeficientes de duración

Para estimaciones de magnitudes e intensidades de precipitación en períodos de tiempo pequeño a partir de precipitaciones en 24 horas (Sec 3.1.1), se utilizan los **coeficientes de duración** propuestos por Espíldora, definidos como el cociente entre la precipitación caída en "t" min. y la precipitación correspondiente en 1 hora, asociadas a un mismo período de retorno. La mayor utilidad de los coeficientes de duración propuesto por Espíldora se debe a que fueron calculados a partir del régimen pluviométrico de Chile (Tabla N°3 y Fig. N°1).

Ecuación N°4. Cálculo de coeficiente de duración

$$CD_t = \frac{P_t (mm)}{P_{60} (mm)}$$

- CD_t** : Coeficiente de duración para t min.
- P_t** : Precipitación para t min.
- P_{60}** : Precipitación en 60 min.

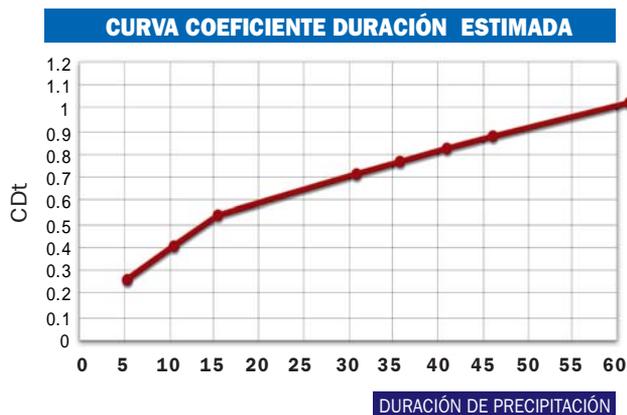
TABLA N° 3. Coeficientes de duración (Espíldora, 1971)

DURACIÓN t	COEFICIENTE CDT
5 min.	0.26
10 min.	0.4
15 min.	0.53
30 min.	0.7
45 min.	0.86
60 min.	1
120 min.	1.4
24 hrs.	4.04

Por ejemplo, si queremos obtener la precipitación ocurrida en 10 minutos a partir de la ocurrencia de una precipitación de 30 mm en 1 hora, primero debemos obtener el coeficiente de duración, en este caso de 0.4 para 10 minutos (Tabla N° 3, valor que también puede ser obtenido del Fig. N°1). Por lo tanto, la magnitud de precipitación en 10 minutos es 12 mm deducida de la ecuación N°4.

$$CD_t = \frac{P_t (mm)}{P_{60} (mm)} \rightarrow P_t (mm) = CD_t * P_{60} (mm) \rightarrow P_{10min} \rightarrow 0.4 * 30mm = 12mm$$

Fig. N°1. Curva de coeficiente de duración estimada a partir de los datos generados por Espíldora



La curva de intensidad, duración y frecuencia estimada por Espíldora (Bonelli 1986) y las calculadas con posterioridad por Varas y Sánchez, con un número superior de datos pluviométricos, tienen diferencias significativas en los coeficientes de duración para 24 horas (CD_{24hr}). Espíldora, 4.04, y Varas y Sánchez, 6.45, diferencia superior al 60%. Bonelli (1986) explica que las estimaciones a partir del valor propuesto por Espíldora exceden a las precipitaciones reales, en la mayoría de los casos. Ante esta situación se recomienda utilizar un coeficiente de duración intermedio (Montt ¹i, 2002). Es decir, 4.9, valor estimado a partir de la fórmula de Grunsky.

3.1.2.2 Cálculo de magnitudes e intensidades de lluvias

Conocida la precipitación en 24 horas (P_{max}) asociada a un período de retorno R (Sección 3.1.1; Ecuación N° 3) se determina la magnitud e intensidad de la precipitación, para un tiempo t, con el mismo Período de Retorno R, a partir de las siguientes ecuaciones.

Ecuación N° 5. Cálculo de magnitud de precipitación en un tiempo t para un período de retorno R (Espíldora, 1971)

$$P_t = \left\{ \frac{CD_t}{CD_{24}} \right\} x P_{max} ; P_t = \left\{ \frac{CD_t}{4.9} \right\} x P_{max} x K$$

Ecuación N° 6 Cálculo de intensidad en un tiempo t para un período de retorno R (Espíldora,

$$I_t = \frac{1}{t} x \left\{ \frac{CD_t}{CD_{24}} \right\} x P_{max} ; I_t = \frac{1}{t} x \left\{ \frac{CD_t}{4.9} \right\} x P_{max} x K$$

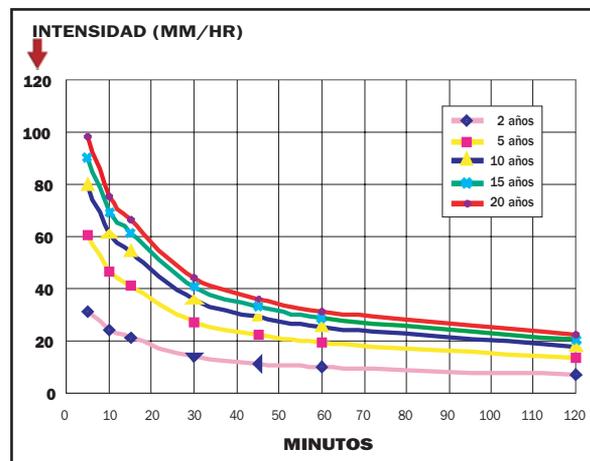
I_t	: Intensidad de precipitaciones en t min. con período de retorno de R años (mm/hr).
t	: Tiempo de precipitación en t min.
P_t	: Precipitación en t min. con un período de retorno R años (mm).
P_{max}	: Precipitación en 24 hrs con período de retorno R años (mm). (Sec. 3.1.1).
CD_t	: Coeficiente de duración en t min.
CD₂₄	: Coeficiente de duración en 24 horas.
K:	: Cociente entre la lluvia caída en 24 horas (P_{24}) y la lluvia diaria (P_d) (Vargas y Sánchez, citado por Bonelli 1986).
$\frac{P_{24}}{P_d} = 1.1$	

1971)

Los valores de magnitud e intensidad, obtenidos precedentemente a partir de las ecuaciones anteriores, originarán la curva de intensidad,

duración y frecuencia (Fig. N° 2), valor es que más tarde serán utilizados en el diseño de zanjas y canales, respectivamente.

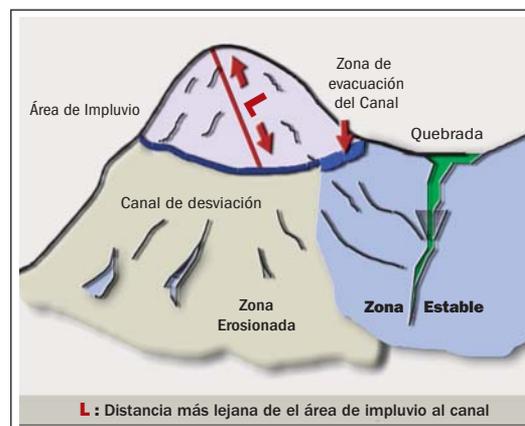
Fig. N°2. Curva de duración, intensidad y frecuencia, comuna Paredones.



3.2 DISEÑO DE CANALES DE DESVIACIÓN

Un canal debe ser capaz de encauzar las aguas vertidas en él, originadas de la máxima escorrentía que pueda ocurrir en el área de impluvio, en un tiempo determinado, **escorrentía crítica** (Suárez de Castro, 1979).

Fig. N°3. Diagrama de ubicación y sistematización del canal de desviación



3.2.1 Cálculo de escorrentía crítica

La escorrentía que deberá evacuar el canal de desviación dependerá de:

- La máxima intensidad de lluvias que puedan ocurrir en un período y tiempo determinados.
- Característica de las vertientes (pendiente, cubierta vegetal, suelo, etc.).
- Extensión de la ladera (área de impluvio).

La escorrentía crítica se puede calcular a partir de la siguiente fórmula (Suárez de Castro, 1978; Morales, 1995):

Ecuación N°7. Cálculo de la escorrentía crítica (Suárez de Castro, 1979)

En donde:

$$Q_{esc} = \frac{C \times I \times A}{360}$$

Q_{esc}	: Escorrentía crítica (m3/seg);
C	: Coeficiente de escorrentía;
I	: Intensidad crítica de las precipitaciones (mm/hr) y
A_i	: Área de impluvio (hectáreas).

- Coeficiente de Escorrentía (C)

Según Monsalve (1999), coeficiente de escorrentía se define como la relación entre el volumen de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitada, en un intervalo de tiempo dado (Tabla N°4). Al respecto, señala Chow (1994) que el coeficiente de escorrentía (C) es la variable menos precisa para el cálculo de la escorrentía crítica (**Q_{esc}**). La certeza del valor tabla dependerá de la experiencia en terreno de quien diseñe las obras de conservación.

TABLA N° 4.
Coeficiente de escorrentía (Benítez et al, 1980)

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	>50%	20-50 %	5-20%	1-5%	0-1%
		SIN VEGETACIÓN	Impermeable	0.80	0.75	0.70
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
CULTIVOS	Impermeable	0.70	0.55	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
PASTOS, VEG. LIGERA	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
HIERBA, GRAMA	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
BOSQUE, DENSA VEG.	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

- Intensidad crítica de las precipitaciones (I)

Definida como la máxima intensidad que puede ocurrir en un tiempo igual al tiempo de concentración (t_c), entendiéndose tiempo de concentración, según Suárez de Castro (1979), como el tiempo que ocupa una gota de agua en moverse desde la parte más lejana de la vertiente hasta el desagüe (ver Fig. N° 3). El tiempo de concentración puede estimarse por medio de la ecuación N° 8 o 9 o Fig. N° 4.

TABLA N° 5. Velocidad de agua (Benítez et al, 1980)

DESCRIPCIÓN DE LA VERTIENTE	Velocidad en metros por segundo					
	Pendiente del terreno en porcentaje					
	0-4	4-10	10-15	15-20	20-25	25-30
CON BOSQUE	0.3	0.6	1	1.2	1.5	1.5
CON POTRERO	0.45	0.9	1.2	1.5	1.6	1.8
CON CULTIVO LIMPIO	0.6	1.2	1.5	1.7	1.8	1.9

Ecuación N° 8. Cálculo del tiempo de concentración

$$T_c = \frac{L}{V_{agua}}$$

T_c	: Tiempo de concentración (seg.)
L	: Distancia más lejana al canal de desviación o cauce principal (m)
V_a	: Velocidad de agua (Tabla N°5)

Ecuación N° 9. Fórmula de Kirpich para el cálculo de tiempo de concentración (López, 1994)

$$T_c = \left\{ \frac{0.87 * L^3}{H} \right\}^{0.385}$$

T_c	: Tiempo de concentración (hr)
L	: Distancia más lejana al canal de desviación o cauce principal (km)
H	: Diferencia de nivel entre la salida de la cuenca y el punto hidráulicamente más alejado (m).



Fig. N°4. Gráfico "Tiempo de Concentración"
(Adaptado de Benítez et al, 1980)



DISTANCIA EN METROS	
1	(Bosque; pendiente 0-4%)
2	(Potrero; pendiente 0-4%)
3	(Bosque; pend. 4-10%) (Cultivo limpio; pend. 0-4%)
4	(Bosque; pend. 10-15%)
5	(Bosque; pend. 15-20%)(Potrero; pend. 10-15%)(Cult. Limp; pend. 4-10%)
6	(Bosque; pend. 20-25%)(Potrero; pend. 10-15%)(Cult. Limp; pend. 10-15%)
7	(Bosque; pend. 25-30%)(Potrero; pend. 15-20%)
8	(Potrero; pend. 20-25%)(Cultivo Limpio; pend. 15-20%)
9	(Potrero; pend. 25-30%)(Cultivo Limpio; pend. 20-25%)
10	(Cultivo Limpio; pend. 25-30%)

Conocido el tiempo de concentración (T_c) para el canal a diseñar, se debe obtener el valor de intensidad crítica (I) para el cálculo de la escorrentía crítica, con un tiempo t igual al tiempo de concentración T_c (Sección 3.1.2.2; Ecuación N° 6).

3.2.2 Especificaciones técnicas de diseño del canal.

Un canal de desviación adecuado debe contener la escorrentía crítica (Sección 3.2.1; Ecuación N°7) y, según el terreno, conducir el caudal a una velocidad menor que la máxima permitida para que la estructura del canal no se socave. Obtenida la escorrentía crítica y máxima

velocidad per mitida, se determina el **área mínima** que deberá poseer la sección transversal, a partir de la cual el canal podrá cumplir con las características anteriormente señaladas.

- Máxima velocidad del agua

Según Suárez de Castro, depende de la naturaleza del material en el cual se construye el canal (Tabla N°6).

- Área mínima

El diseño de un canal de desviación requiere de una serie de iteraciones a partir de una sección transversal del canal, la cual como mínimo debiera tener una superficie igual a la calculada según Ecuación N°10.

Ecuación N° 10. Área mínima de diseño del canal

$$A_{\min} = \frac{Q_{\text{esc}}}{V_{\max}}$$

V_{\max}	: Máxima velocidad per mitida (Tabla N° 6)
Q_{esc}	: Escorrentía crítica (Ecuación N° 7)

3.2.3 Diseño sección transversal

Una vez conocidas las especificaciones de escorrentía crítica, máxima velocidad per mitida y área mínima, se deberá realizar una serie de iteraciones, de sucesivas secciones transversales, a fin de encontrar aquella sección que sea capaz de trasladar de manera segura el caudal para el cual se diseña. Para este fin se propone una metodología descrita a continuación:

TABLA N° 6.

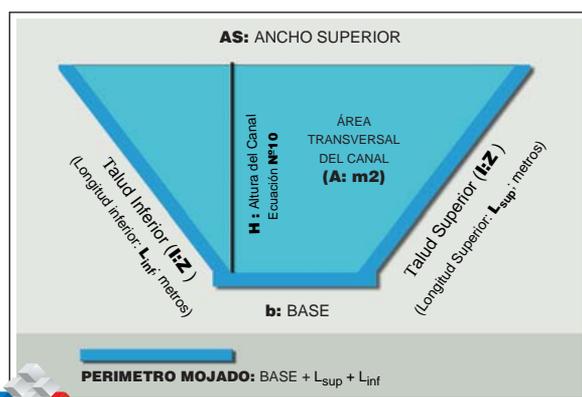
Máximas velocidades per mitidas en canales (V_{\max}) (Suárez de Castro, 1978)

MATERIAL	Velocidad media en metros por segundo
Suelo Arenoso muy suelto	0.3 - 0.45
Arena gruesa o suelo arenoso suelto	0.45 - 0.6
Suelo arenoso promedio	0.6 - 0.75
Suelo franco arenoso	0.75 - 0.83
Suelo franco de aluvión o ceniza volcánica	0.83 - 0.9
Suelo franco pesado o franco arcilloso	0.9 - 1.2
Suelo arcilloso o cascajoso	1.2 - 1.5
Conglomerado, cascojo cementado, pizarra blanda, hard pan, roca sedimentaria blanda	1.8 - 2.4
Roca dura	3 - 4.5
Hormigón	4.5 - 6

1. Selección de área para la primera iteración. Se recomienda utilizar un área igual o superior al área mínima de diseño (Ec. N° 10).
2. Determinación de parámetros de la sección transversal base y taludes, según experiencia de terreno.
3. Cálculo de los parámetros de altura (H , ecuación N° 11), ancho superior (a_s , Ecuación N° 12), longitud de taludes inferior y superior (L_{inf} y L_{sup} , Ecuaciones N° 13 y N° 14) y radio hidráulico (r , Ecuación N° 15).
4. Asignación de pendiente del canal (según experiencia de terreno) y determinación de un coeficiente de rugosidad (n , Tabla N° 8).
5. Cálculo del caudal y velocidad de transporte del canal. (Ecuaciones N° 17 y 18, respectivamente).
6. Realización de test de control de las especificaciones técnicas del canal (Sección N° 3.2.5).
7. Si el canal no satisface las especificaciones técnicas, se procede a un nuevo diseño, según las opciones:
 - modificación de la pendiente, para luego realizarse nuevamente el test de control; o
 - modificación de la sección transversal (se recomienda un aumento de un orden del 5-10% respecto a la última iterada), volviendo a la secuencia a partir del punto N° 2 de esta sección.

Aprobadas las condicionantes técnicas y el test de control de calidad de diseño, el perfil del canal podrá ser implementado en terreno.

Fig. N° 5. Esquema de sección trapezoidal de canal de desviación



- Cálculo de los componentes de la sección transversal.

Los datos de entrada para el diseño del canal son los siguientes:

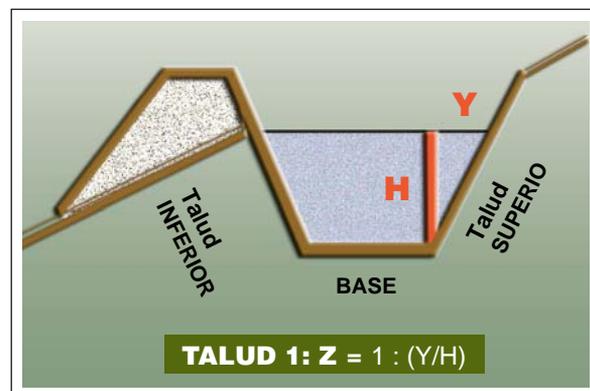
Área de sección transversal de canal	: A_c (superior al área mín.)
Base del canal	: b
Talud inferior	: Z_{inf}
Talud superior	: Z_{sup}

ÁREA (A_c): Área de diseño. Se recomienda utilizar como primera iteración el área mínima de diseño (A_{min} ; Ecuación N° 10) o una levemente superior y aumentar en cada iteración entre un 5 - 10%, hasta encontrar el diseño adecuado.

BASE (b): Valor predefinido normalmente igual a 0,2 m.

TALUD INFERIOR Y SUPERIOR: Entiéndase taludes la inclinación que poseen las paredes laterales del canal y las cuales se expresan en forma de proporción, en donde 1: Z se representa de la siguiente manera:

Fig. N° 6. Taludes en sección transversal



Importante en la determinación de los taludes del canal es que éstos sean adecuados para cada tipo de suelo, de modo que el canal no se desmorone (Z_{inf} - Z_{sup}). Se debe tener cuidado de manera especial en obras de conservación desarrolladas en suelos de texturas livianas (arenosas), construyéndose con taludes mayores (ver recomendaciones hechas por el Ministerio de Obras Públicas para canales de drenaje o protección de carreteras; Tabla N° 7).

TABLA N° 7.

Taludes recomendados para la sección trapezoidal de un canal (MOP, 1981)

TERRENO	TALUD (Z)
ROCA	Casi vertical
TURBA	0.25
ARCILLA Y REVESTIMIENTO DE HORMIGÓN	0.5 - 1
TIERRA	1
SUELO ARENOSO	2

Se debe considerar que para una misma sección transversal, aquélla que posea el mayor radio hidráulico (proporción entre el área transversal A_c y el perímetro mojado; Fig. N°5) es la sección capaz de trasladar el mayor caudal (en las secciones desarrolladas para obras de conservación de suelo en el marco del D.L 701, estos taludes (Z) se encuentran entre 0.3 y 1).

Ecuación N° 11. Determinación de altura de sección transversal del canal

$$H = \frac{-2b + \sqrt{4b^2 + 4(Z_{inf} + 8Z_{sup})(2A_c)}}{2(Z_{inf} + Z_{sup})}$$

En donde:

b	: Base.
Z_{inf}, Z_{ext}	: Talud inferior y superior, respectivamente.
A_c	: Área de la sección transversal del canal.

Una vez calculada la altura se procede al cálculo de las siguientes componentes de la sección transversal del canal.

Ecuación N° 12. Cálculo de ancho superior de sección transversal del canal de desviación

$$a_s = b + H * Z_{inf} + H * Z_{Sup}$$

En donde: **a_s**: ancho superior.

Ecuación N° 13. Cálculo de longitud de talud inferior

$$L_{inf} = \sqrt{H^2 + (H * Z_{inf})^2}$$

Ecuación N° 14. Cálculo de longitud de taludes superior

$$L_{sup} = \sqrt{H^2 + (H * Z_{sup})^2}$$

Ecuación N° 15. Cálculo del radio hidráulico para una sección trapezoidal

$$r : \text{Radio - hidráulico} = \frac{\text{Área - transversal}}{\text{Perímetro - mojado}} = \frac{A_c}{(b + L_{sup} + L_{inf})}$$

Opcionalmente para comprobar si los cálculos de los parámetros de la sección transversal fueron bien efectuados, se recomienda calcular el área de la sección transversal con la ecuación N° 16, que debiera ser igual al área de diseño A_c .

Ecuación N° 16. Cálculo de área de sección transversal

$$A_c = (b + a_s) * \frac{H}{2}$$

3.2.4 Capacidades del canal diseñado

Una vez diseñada la sección transversal del canal, es asignada una pendiente para el canal y se determina el coeficiente de rugosidad del canal que corresponde a las condiciones de terreno (n; según Tabla N°8). Con estos valores se calcula la velocidad y el caudal que transportará el canal por medio de las ecuaciones de Manning descritas a continuación.

TABLA N° 8.

Valores de n para fórmulas de Manning (Morales et al, 1995)

VALORES DE N CANALES Y ZANJAS	CONDICIÓN DE PAREDES		
	0Malo	Regular	Bueno
En tierras, alineados y uniformes	0.02	0.0225	0.025
En rocas lisos y uniformes	0.03	0.033	0.035
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.025	0.0275	0.03
Dragados en tierra	0.0275	0.03	0.033
Con lecho pedregoso y bordes de tierra enhierbados	0.03	0.035	0.04
Fondo (plantilla de tierra, taludes ásperos)	0.03	0.033	0.035

Ecuación N° 17. Cálculo de caudal según Manning (Suárez de Castro 1979; López et al, 1995)

$$Q_c = \frac{1}{n} A r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación N° 18. Cálculo de velocidad de un canal según Manning (Suárez de Castro 1979; López et al, 1995)

$$V_c = \frac{1}{n} r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}}$$

V_c	: Velocidad media del agua en el canal (m/seg).
Q_c	: Caudal del canal en (m ³ /seg).
n	: Coeficiente de fricción (condición del canal, V er Tabla N°8).
r	: Radio hidráulico (área transversal del canal, en metros cuadrados, dividida por el perímetro mojado, en metros; Ecuación N°15).
s	: Pendiente del canal.
A	: Área del canal (como mínimo Ecuación N°10) A min.

3.2.5 Test de control de especificaciones técnicas del canal

Obtenidos los valores del caudal y velocidad se verifica si el diseño del canal se encuentra realizado en concordancia con las **especificaciones técnicas** (Sección 3.2.2). De no ser así, se deberá realizar un nuevo diseño (modificando la pendiente y/o la sección transversal), que deberá someterse nuevamente a verificación. Así sucesivamente hasta encontrar el diseño adecuado.

- Condicionantes técnicas

De esta forma, el diseño de un canal deberá cumplir con las siguientes características:

- **Área del canal sea mayor o igual que el área mínima (A_{min} : Q_{esc} / V_{max} en donde Q_{esc} : escorrentía crítica; Ecuación N° 7 y V_{max} : Velocidad máxima permitida; Tabla N°6).**

Ac (Ecuación N°16) >= Amin (Ecuación N°10).

- **Escorrentía crítica (Q_{esc}; Ecuación N° 7) sea menor que el caudal Q_c determinado para el canal diseñado (Ecuación N° 17).**

Q_c (Ecuación N° 17) >= Qesc (Ecuación N° 7).

- **La velocidad del flujo del canal (Ver Ecuación N° 18) sea menor que la velocidad máxima permitida según las características del canal diseñado (V_{max}; Tabla N° 6).**

Vc (Ecuación N° 18) <= Vmax (Tabla N° 6).

3.3 DISEÑO DE SISTEMA DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN

Según Millán 2000, cada zanja de infiltración debe contener la totalidad del escurrimiento superficial para una determinada precipitación de diseño. El autor considera el cálculo de la precipitación efectiva (P_e) como estimador de esta escorrentía. Esta situación sólo se cumple en forma práctica en suelos no saturados.

Calculada la precipitación efectiva (Ecuación N° 19; Sección n° 3.3.1), se pueden considerar dos opciones en el diseño de un sistema de zanjas de infiltración:

- a) A partir de un área predeterminado de la sección transversal. Por lo tanto, definidas sus componentes (base, b; altura, H; ancho superior, a_s; talud superior e inferior; Z_{sup} y Z_{inf}, longitudes de talud superior e inferior; L_{sup} y L_{inf} Fig. N°5) y largo de una zanja, se determina el distanciamiento entre ellas.
- b) A partir de un distanciamiento entre zanjas predeterminado (asociado, por ejemplo, a un esquema de plantación), se determina el área de la sección transversal y posteriormente se calculan sus componentes (base, b; altura, H; ancho superior, a_s; talud superior e inferior; Z_{sup} y Z_{inf}, longitudes de talud superior e inferior; L_{sup} y L_{inf} Fig. N°5).



3.3.1 Cálculo de precipitación efectiva

Antes es necesario especificar el concepto precipitación efectiva P_e . Básicamente es la diferencia entre la lluvia caída y el agua infiltrada. Es decir, el agua escurrida. En un sistema de zanja corresponderá a la escorrentía proveniente del área impluvio de la zanja (Fig. N°5). Para el cálculo de la precipitación efectiva se requiere del siguiente procedimiento.

- Máxima precipitación en una hora con un período de retorno de 10 años, valor calculado del análisis de las precipitaciones descritas en la Sección N° 3.1.
- Obtención del coeficiente de escorrentía a partir de las características de terreno (Tabla N° 4).

Ecuación N° 19. Cálculo de la precipitación efectiva (Millan et al, 2000)

$$P_e = P_t \times C$$

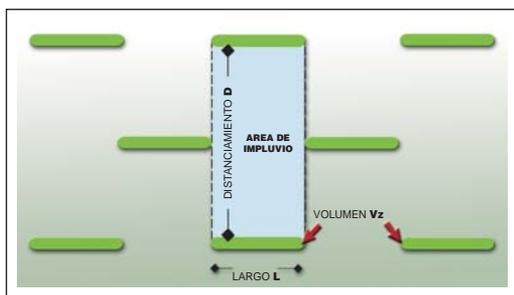
En donde:

P_e	: Precipitación efectiva (mm).
P_t	: Precipitación máxima en 1 hora (mm) correspondiente a un período de retorno R (10 años).
C	: Coeficiente escorrentía (Tabla N°4).

3.3.2 Cálculo del distanciamiento entre zanjas a partir de una superficie de la sección transversal predeterminada.

Como valores de entrada se necesitan precipitación efectiva (P_e) y dimensiones de la zanja (largo, superficie de sección transversal; por lo tanto, todos los componentes de la sección transversal; es decir, base, altura, ancho superior, taludes inferior y superior). Para este análisis será considerado sistema de zanja distribuido en tresbolillo, como el descrito a continuación.

Fig. N° 7. Diagrama de sistema de zanja en tresbolillo, unidad sistematizada.



- Cálculo del distanciamiento entre zanjas.

Ecuación N° 20. Cálculo del distanciamiento entre zanja (Millan et al, 2000)

$$D = 1000 * \frac{A_z}{L * P_e}$$

D	: Distancia entre zanja (m).
A	: Área de zanja (sección transversal: m ²).
L	: Largo zanja (m).
P_e	: Precipitación efectiva (mm), en tiempo de una hora.

3.3.3 Cálculo superficie sección transversal de la zanja a partir de distanciamiento predeterminado entre zanjas.

En este segundo caso se busca obtener las dimensiones de la zanja que sea capaz de retener la escorrentía que recibirá del área de impluvio resultante del distanciamiento predeterminado (Fig. N° 5).

Como valores de entrada para el cálculo del área de la sección transversal, se necesita la precipitación efectiva (P_e) y distanciamiento entre zanja (D ; Fig. N°7).

Ecuación N° 21. Cálculo de la superficie de la sección transversal de zanja de infiltración a partir de un distanciamiento predeterminado

$$A_z = \frac{D * P_e}{1000}$$

A_z	: Superficie de la sección transversal (Ver Fig. N°5).
D	: Distancia entre zanja (m).
P_e	: Precipitación efectiva (mm).

Una vez conocida la superficie de la sección transversal, se calculan sus parámetros, teniendo en consideración como valor de referencia las recomendaciones sobre taludes (Tabla N° 7) y adecuándose a las restricciones legales (D.L.701).

- Diseño de la sección transversal de la zanja de infiltración

A partir del área de la sección transversal de la zanja (ecuación N° 9), se procede a su diseño, que requiere como valores de entrada: base (b), taludes (Z_{inf} y Z_{sup}), datos asignados en forma arbitraria extraídos de la experiencia en terreno. Con esta información se determinan los demás componentes de la sección transversal, mediante las siguientes ecuaciones:

- Altura sección transversal:
H (Ecuación N° 11).
- Ancho superior sección transversal **a_s**:
(Ecuación N° 12).
- Longitud del talud inferior: **L_{inf}**
(Ecuación N° 13).
- Longitud del talud superior: **L_{sup}**
(Ecuación N° 14).

Obtenidos los resultados anteriores, se podrá construir la matriz de la zanja que más tarde podrá ser ejecutada en terreno.

3.4 RECOMENDACIONES GENERALES

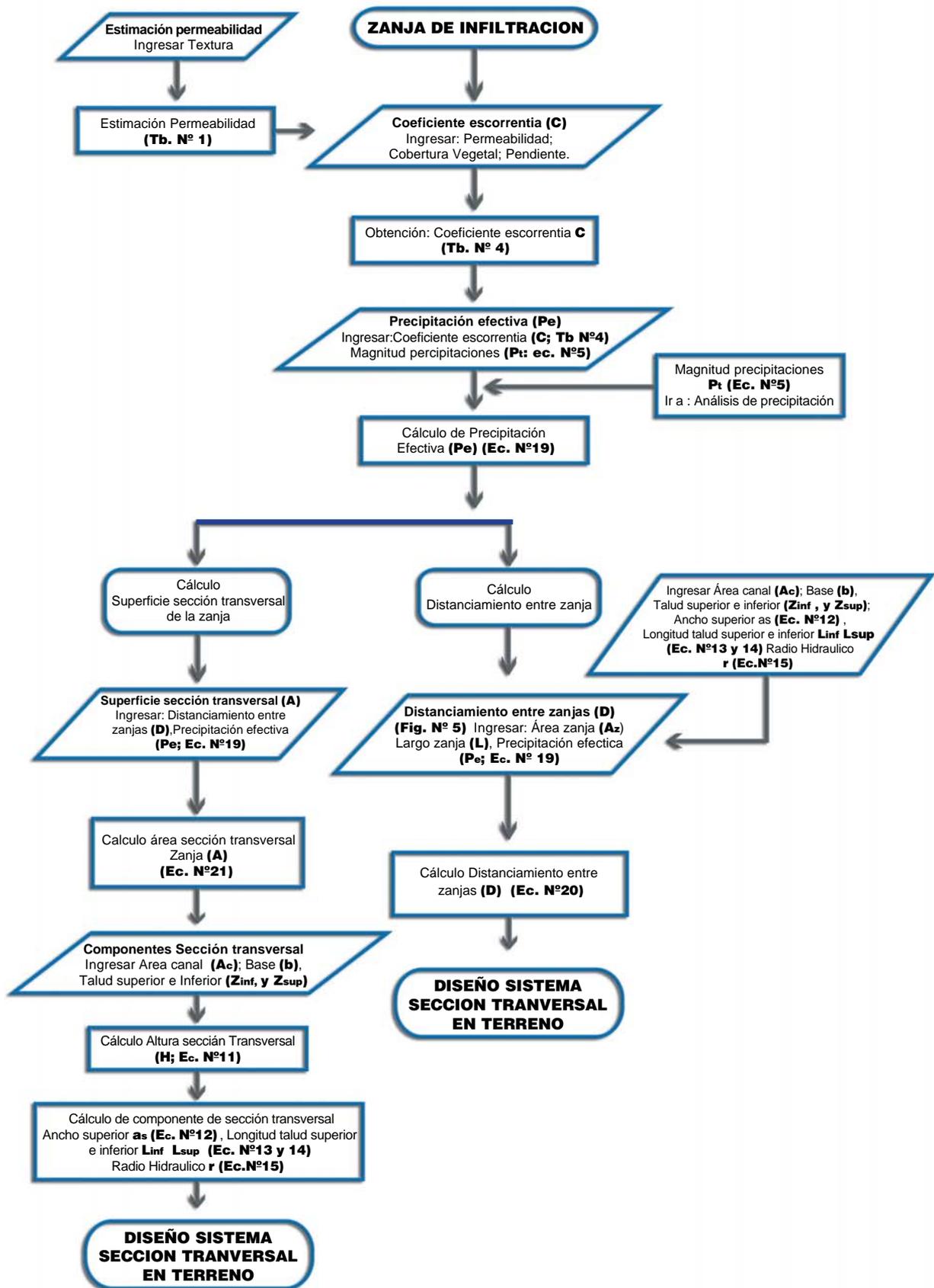
- En el diseño de canales y zanjas es recomendable sobredimensionar la capacidad de estas obras de evacuación e infiltración, respectivamente, teniendo presente que el diseño no considera mayormente suelos saturados y guardando el debido equilibrio entre beneficio y costo.
- En consideración a los diferentes tipos de suelos que podemos encontrar es recomendable tener este factor en cuenta a la hora de determinar los taludes, ya que una mala determinación de éstos tendría como consecuencia el socavamiento de sus paredes laterales.
- Debido a los accidentes topográficos del microrelieve, la distribución espacial de las obras en terreno se ve en la práctica alterada seriamente. Pero a pesar de estas dificultades, debiera siempre propenderse a conformar unidades sistematizadas lo más homogénea posible de acuerdo al diseño original (zanjas, Fig. N° 7; canales Fig. N° 3). Entiéndase como unidad sistematizada la conformada por una área de captación de aguas lluvias (área de impluvio) y un área de recepción correspondiente a la obra misma.
- El correcto funcionamiento y mantenimiento de cada obra de conservación estarán directamente relacionados con su vida útil, ya que procesos como la sedimentación reducen su capacidad de evacuar o retener escorrentía superficial, según sea el caso, disminuyendo por ende el período de retorno para el cual fueron construidas.

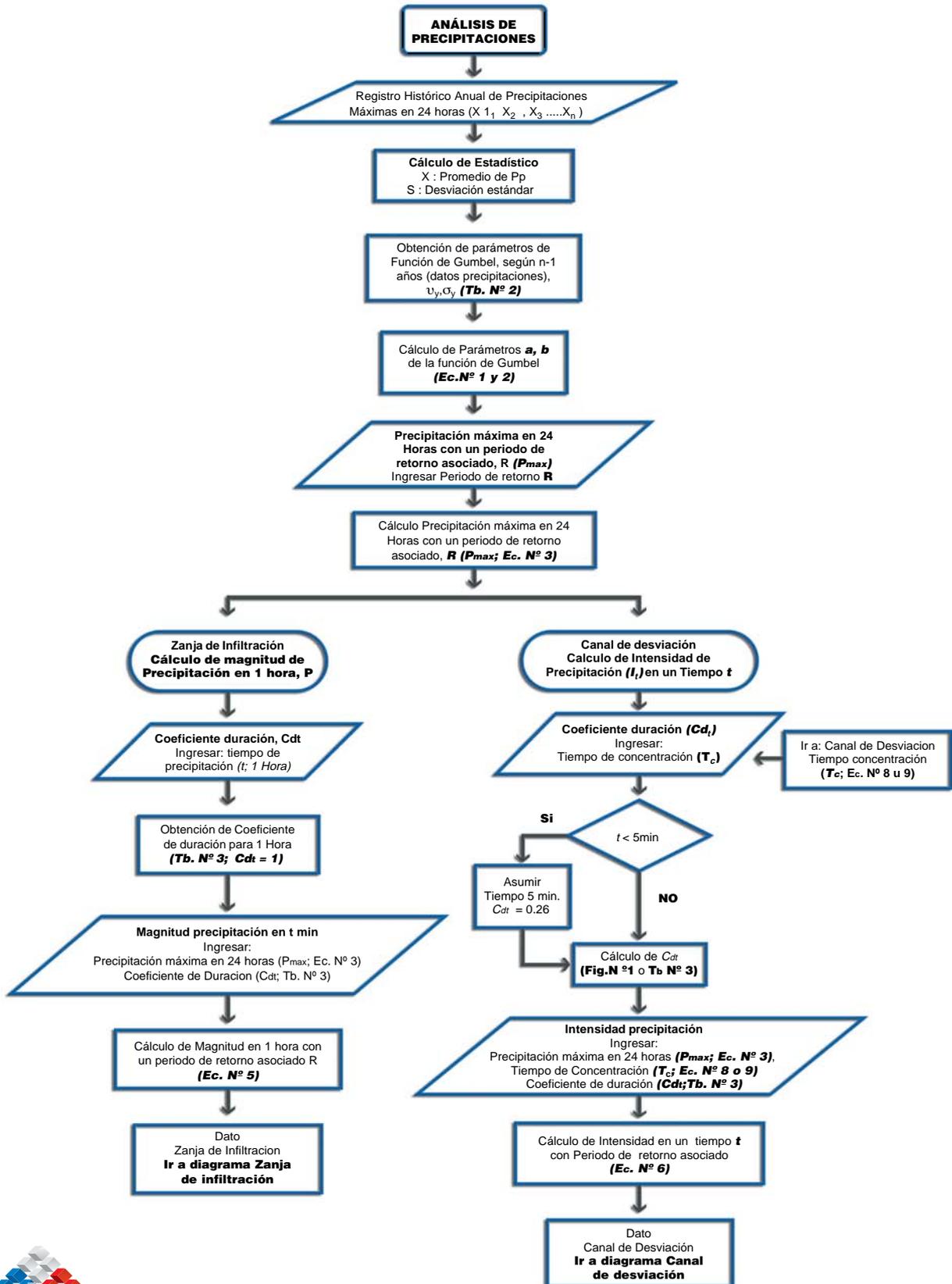
BIBLIOGRAFÍA

- Benítez, C.; Arias, W.; y Quiroz, J. 1980. **Manual de Conservación de Suelos y Aguas**. Ministerio de Agricultura y Alimentación. Dirección General de Aguas y Suelos. Lima, Perú.
- Bonelli, A. 1986. **Mapas de Isoyetas de Precipitaciones Máximas de 24 - 48 - 72 horas para Diferentes Períodos de Retorno**. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Santiago.
- Chow, V.; Maidment, D.; y Mays, L. 1994. **Hidrología Aplicada**. Ediciones McGraw - Hill.
- Francke, S.; Vargas, R.; Williams, E.; Pinto, M.; y Barría, B. 1999. **Recuperación de Suelos Degradados en el Marco de la Nueva Ley de Fomento Forestal**. Corporación Nacional Forestal. Santiago.
- Espildora. 1971. **Estimación de Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia Mediante Coeficientes Generalizados**. I Coloquio Nacional, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile.
- López, F. et al; TRAGSA. 1994. **Restauración Hidrológica y Forestal de Cuencas y Control de la Erosión**. TRAGSA. Tecnologías y Servicios Agrarios S.A. Madrid, España.
- Navarro, G.; Lemus, M.; Vásquez, R.; y Bravo, R. 2000. **Restauración Hidrológica de la Cuenca Poniente del Poblado de Sierras de Bellavista**. Corporación Nacional Forestal.
- Martínez de Azagra, A. 1996. **Diseño de Sistemas de Recolección de Agua para la Repoblación Forestal**. Ediciones Mundi - Prensa. Madrid.
- Millan, J.; Manzanares, P.; García, J; Real, P. 2000. **Estudio Básico Manejo, Restauración de Suelos y Control de Erosión Cuenca Estero Nihue VI Región**. Univ. de Concepción.
- Ministerio de Obras Públicas, 1981. **Manual de Carreteras**. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Monsalve, G. 1999. **Hidrología para Ingeniería**. Ed. Alfaomega. México.
- Morales, J.; Uzon, V. 1995. **Recuperación de Suelos en Sistemas Productivos Campesinos de Chile Central**. Experiencias prácticas para extensionistas. DEFOR, Santiago, Chile.
- Peralta, M. 1976. **Uso, Clasificación y Conservación de Suelo**. Servicio Agrícola y Ganadero. Chile.
- Suárez de Castro, 1979. **Conservación de Suelo**. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica.

Ministerio de Obras Públicas, 1981. **Manual de Carreteras**. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.







GRAFICA LASCAR (562) 5565708

