

VIII

Hidráulica de Canales



Parámetros Hidráulicos en canales

Todo sistema de riego por superficies está sustentado en un complejo de canales que aportan el agua a cada parcela para posteriormente por medio de los principios de la hidráulica aplicar el riego, por surcos o melgas, a nuestros cultivos, además los excesos de agua deben de ser evacuados por una segunda red de canales de drenaje; por estas razones el establecimiento de una buena red de canales con sus correctas estructuras hidráulica redunda en una mayor eficiencia en nuestros regadíos.

Los canales pueden ser contruidos con diferentes tipos de secciones trasversales, las más utilizadas son las trapezoidales y rectangulares para la construcción de canales de medianos a grandes caudales, mientras las parabólicas son la forma que adoptan las zanjás que se construyen para el transporte de pequeños caudales dentro de las parcelas, como el caso de los surcos donde el caudal con que se trabaja es equivalente a la velocidad de infiltración del suelo.

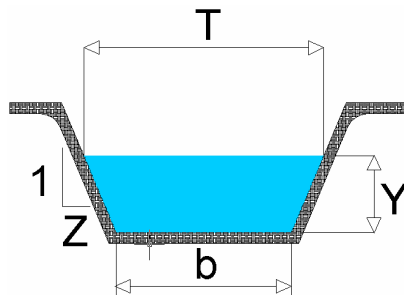


Figura 8.1 Sección trapezoidal de un canal

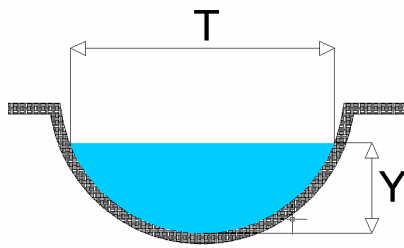


Figura 8.2 Sección parabólica de un canal

Donde:

Y: Tirante o altura del nivel del agua con respecto al fondo

b: Ancho de solera o ancho del canal en el fondo

T: Espejo de agua: ancho superior del canal cubierto con agua

Z: Talud: proyección horizontal de la pared cuando la proyección vertical es 1

Las principales características geométricas de estas secciones se observan en el siguiente cuadro:

Cuadro 8.1 Parámetros geométricos en canales de diferentes secciones

Sección	Área Hidráulica (A)	Perímetro Mojado (P)	Radio Hidráulico (R)	Espejo de agua (T)
Rectangular	$A = by$	$P = b + 2y$	$R = \frac{by}{b + 2y}$	$T = b$
Trapezoidal	$A = (b + Zy)y$	$P = b + 2y\sqrt{1 + Z^2}$	$R = \frac{(b + Zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}}$	$T = b + 2Zy$
Triangular	$A = Zy$	$P = 2y\sqrt{1 + Z^2}$	$R = \frac{Zy}{2\sqrt{1 + Z^2}}$	$T = 2Zy$
Parabólica	$A = \frac{2}{3}Ty$	$P = T + \frac{8y^2}{3T}$	$R = \frac{2yT^2}{3T^2 + 8y^2}$	$T = \frac{3A}{2y}$

Obsérvese que la sección trapezoidal es una forma general de las sección rectangular (sec. trapezoidal con $z = 0$) y la sección triangular (sec. Trapezoidal con $b = 0$), por lo que todas las propiedades geométricas para rectángulos y triángulos pueden ser valoradas con las fórmulas de la sección trapezoidal.

Los flujos en canales abiertos uniformes de equilibrio se conocen comúnmente como “flujos uniformes” o “flujos normales”. Ocurre cuando la velocidad es idéntica en cualquier punto, en magnitud y dirección, para cualquier instante:

$$\frac{\partial V}{\partial s} = 0$$

Se considera que el flujo en algunos canales, ríos, e inclusive en surcos y melgas, es uniforme, sin embargo, la condición de uniformidad es poco frecuente y debe entenderse que únicamente porque los cálculos para flujo uniforme son relativamente sencillos y por que estos aportan soluciones satisfactorias, se justifica esta simplificación.

Ecuación de Manning

Es la ecuación mas utilizada para el análisis de canales en flujo uniforme, en esta fórmula la velocidad está en función de la geometría de la sección del canal, la pendiente y un coeficiente de rugosidad como se muestra a continuación:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad \dots(81)$$

Donde:

Q: Caudal o gasto, en m^3/s .

A: Área de la sección transversal, en m^2 .

R: radio hidráulico, en m.

S: pendiente de la línea de energía, en m/m.

n: coeficiente de rugosidad.

En la fórmula anterior los parámetros del área y radio hidráulico son propiedades de la sección del canal por lo que se utilizan para su cálculo las fórmulas del Cuadro 8.1

La pendiente, en general, debe ser la máxima que permita dominar la mayor superficie posible de tierra y que, a la vez, dé los valores para la velocidad que no causen erosión del material en que está alojado el canal, ni favorezcan el depósito de sedimentos. Este parámetro depende de dos factores en su selección: el relieve topográfico y las cualidades del canal.

Cuadro 8.2 Pendiente admisible en función del tipo de suelos (M. Villón, 1995)

Tipos de suelo	Pendiente (S) ‰
Suelos sueltos	0.5 – 1.0
Suelos francos	1.5 – 2.5
Suelos arcillosos	3.0 – 4.5

La rugosidad depende del tipo de material con que se revista el canal revestimiento, a continuación se detallan (Cuadro 8.3) una serie de valores de rugosidad para diferentes tipos de canales:

Si calculamos la velocidad por la ecuación de continuidad, debemos tener el cuidado que este valor no supere ciertos valores que puedan

causar erosión dentro del canal. El Cuadro 8.4 presenta las velocidades máximas recomendados para canales construidos en tierra.

Cuadro 8.3 Valores de n para diferentes tipos de material.

Material	Coeficiente de rugosidad (n)
Canales revestidos con concreto	0.014
Superficie de mampostería con cemento	0.020
Canales en tierra, alineados y uniformes	0.025
Canales en roca, lisos y uniformes	0.033
Canales en roca, con salientes y sinuosos	0.040
Canales dragados en tierra	0.0275
Canales con lecho pedregoso y bordos de tierra enyerbados	0.035
Corrientes naturales limpias, bordos rectos, sin hendeduras ni charcos profundos	0.030
Corrientes naturales igual al anterior, pero con algo de hierba y piedra	0.035
Corrientes naturales igual al anterior, pero menos profundas, con secciones pedregosas	0.055
Ríos con tramos lentos, cauce enhierbado o con charcos profundos	0.070
Superficies lisa y desnuda	0.04
Cultivos en líneas, en melgas a nivel	0.04
Cereales sembrados en hilera, si éstas están trazadas en la dirección del flujo	0.10
Alfalfa, cereales y similares, sembrados al voleo	0.15
Cultivos que forman una densa unión de la vegetación con la masa de suelo, cereales sembrados transversalmente a la dirección del flujo.	0.25

NOTA: Debe considerarse que el diseño de canales, es una de las disciplinas de la hidráulica más complejas; para un desarrollo y análisis más especializado de esta área se recomienda el uso del paquete tecnológico (libro sobre Hidráulica de Canales y software Hcanales para el diseño de estas estructuras) desarrollado en la Escuela de Ing. Agrícola del I.T.C.R por el Ing Máximo Villón.

Cuadro 8.4 Velocidades máximas de erosión.

Material	Velocidad m/s
Arena suelta muy ligera, arena fina	0.45
Grava Arenosa, Arena media	0.50
Suelo arenoso, grava limosa, Arena gruesa, limo aluvial	0.60
Suelo arenosos grueso, ceniza Volcánica, Grava fina	0.75
Tierra franca y arcillosa	0.80
Tierra vegetal aluvial.	0.85
Suelo de cenizas volcánicas.	0.95
Tierra vegetal arcillosa, arcilla dura	1.15
Grava gruesa, pizarra	1.25
Suelo arcillosos duro Arenisca consolidada.	1.50
Cascajo	1.55
Suelo con grava.	1.80
Mampostería de Piedra y concreto	2.00
Conglomerados.	2.40
Roca dura.	4.50
Concreto $f'c=140 \text{ kg/cm}^2$.	4.40
Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$.	7.40

Ejemplo. Hidráulica de canales

Estime los parámetros hidráulicos en flujo uniforme de un canal de sección trapezoidal con las siguientes características:

Suelo: franco arcilloso

Pendiente del 0.05 %

Caudal: $1 \text{ m}^3/\text{seg}$

Talud del 1/1

Ancho de solera: 1 m

SOLUCIÓN

Selecciono la opción para canal trapezoidal, ingreso los datos del canal y oprimo el botón de Calcular

Nótese que la rugosidad es tomada del Cuadro 8.3

La pendiente se ingresa en m/m ($0.05\% = 0.0005 = 0.5\text{‰}$)

The screenshot shows a software window with two tabs: 'Trapezoidal - Rectangular - triangular' (selected) and 'Parabólica'. Below the tabs is a section titled 'Datos del Canal'. It contains five input fields arranged in two columns. The left column has 'Caudal' (1), 'Ancho de Solera (b)' (1), and 'Talud' (1). The right column has 'Rugosidad' (0.03) and 'Pendiente' (0.0005). Units are specified next to some fields: 'm³/s' for Caudal and 'm' for Ancho de Solera. At the bottom left, there is a 'Resultados' button.

Parameter	Value	Unit
Caudal	1	m³/s
Ancho de Solera (b)	1	m
Talud	1	
Rugosidad	0.03	
Pendiente	0.0005	

Figura 8.3

Los resultados se muestran en la siguiente figura

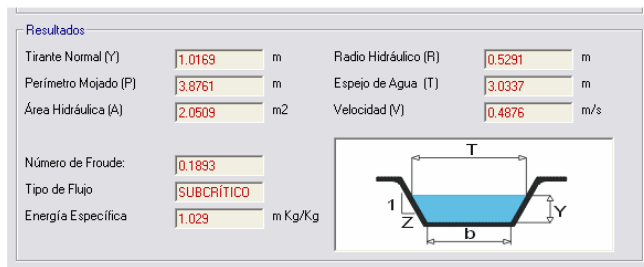


Figura 8.4

Infiltración y eficiencia en canales

Todo canal construido en tierra tiene la característica que presenta una cantidad estimable de pérdidas de agua, al infiltrarse ésta en el suelo. La importancia de esto radica en que los suelos con menor grado de infiltración son más eficientes para conducir el agua, ya que la relación entre los caudales de entrada y salida tiende a ser la unidad.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Caudal de salida}}{\text{Caudal de entrada}} * 100$$

Dentro de los factores que afectan a las pérdidas por infiltración tenemos:

- La permeabilidad del lecho del canal
- Edad del canal
- Caudal transportado (mayor caudal, menor pérdidas)
- Longitud del canal

- La sección del canal

Existen diferentes fórmulas empíricas para la estimación de las pérdidas, a continuación se presentan las utilizadas por el software:

Fórmula de T. Ingham

$$P = 0.0025\sqrt{y}(b + 2Zy)$$

donde:

P = pérdidas, en m³/s-km

b = ancho, de solera en m

y = tirante, en m

Z = talud

Fórmula de Etcheverry

$$P = 0.0064C_e\sqrt{y}(b + 1.33y\sqrt{1 + Z^2})$$

donde :

P = pérdidas, en m³/s-km

C_e = coeficiente que representa la permeabilidad

b = ancho, de solera en m

y = tirante, en m

Z = talud

Cuadro 8.5 Coeficientes a utilizar en la fórmula de Etcheverry

Clase de suelo	C_e
Arcillosos	0.375
Franco arcillosos	0.625
Limosos y francos	0.875
Franco arenosos	1.25
Arenas finas	1.625
Arenas gruesas	2.25
Gravas	4.25

Fórmula de Pavlovski

$$P = 1000K[b + 2y(1 + Z)]$$

donde :

P = pérdidas, en $m^3/s-km$

K = coeficiente de permeabilidad en m/s

b = ancho, de solera en m

y = tirante, en m

Z = talud

En el cuadro 8.6 se muestran los valores de K , en función de la textura. Este mismo cuadro será utilizado el factor K de la ecuación de Kostiakov que se indica posteriormente.

Cuadro 8.6 Coeficientes de Pavlovski y Kostiakov

Clase de suelo	K (cm/s)
Grava	500.5
Arena gruesa	0.505
Arena fina	0.0505
Tierra arenosa	0.00505
Tierra franco arcillosa	0.00005
Tierra franca	0.0005005
Limo	0.00055
Arcilla	0.000005
Arcilla compacta	0.0000005

Fórmula de Davis - Wilson

$$P = \frac{C_d y^{\frac{1}{3}} (b + 2y\sqrt{1 + Z^2})}{8861 + 8\sqrt{v}}$$

donde:

P = pérdidas, en m³/s-km

b = ancho, de solera en m

y = tirante, en m

Z = talud

v = velocidad, media en m/s

C_d = coeficiente que representa la permeabilidad, en m/s

Cuadro 8.7 Coeficientes de Davis- Wilson

Material	C _d
Hormigón de 10 cm de espesor	1
Arcilla de 15 cm de espesor	4
Enlucido de cemento de 2.5 cm	6
Suelo arcilloso	12
Suelo franco arcilloso	15
Suelo franco	20
Suelo franco arenoso	25
Suelo arcillo limoso	30
Arena	45

Fórmula de Punjab

$$P = C_p Q^{0.563}$$

donde:

P = pérdidas, en m³/s-km

Q = caudal, en m³/s

C_p = Valor que varía de acuerdo al suelo

Cuadro 8.8 Coeficientes de Punjab

Material	C _p
Suelos muy permeables	0.03
Suelos comunes (medios)	0.02
Suelos impermeables	0.01

Fórmula de Kostiakov

$$P = 1000K(b + 2.4y\sqrt{1 + Z^2})$$

donde :

P = pérdidas, en m³/s-km

K = coeficiente de permeabilidad, en m/s (ver cuadro 8.6)

b = ancho, de solera en m

y = tirante, en m

Z = talud

Fórmula de E. A. Moritz

Moritz encontró la siguiente fórmula:

$$P = 0.0375C_m A^{\frac{1}{2}} = 0.0375C_m \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{v^{\frac{1}{2}}}$$

donde:

P = pérdidas, en m³/s-km

A = área hidráulica, en m²

C_m = coeficiente que depende del material donde se encuentre el canal.

Q = caudal, en m³/s

v = velocidad, en m/s

Cuadro 8.9 Coeficientes de Moritz

Material	C_m
Franco arcilloso impermeable	0.095
Franco arcilloso semi-impermeable sobre arcilla compacta, a profundidad no mayor de 1 m bajo el fondo del canal	0.13
Franco arcilloso ordinario, limo	0.19
Franco arcilloso con arena o grava, grava cementada (conglomerados), arcilla y arena	0.265
Franco arenoso	0.375
Suelos arenosos sueltos	0.5
Suelos arenosos con grava	0.65
Roca desintegrada con grava	0.825
Suelo con mucha grava	1.4

Pérdidas Totales

Kostiakov estableció que el porcentaje de cambio entre las pérdidas con relación al caudal puede expresarse con la siguiente relación:

$$r = \frac{a}{Q^n}$$

donde:

n: varía entre 0.3 para suelos impermeables y 0.4 para suelos medios y 0.5 para suelos muy impermeables

a : es una constante

Al hacer un balance entre lo que entra y sale tenemos que:

$$Q_{salida} = Q_{Entrada} - Pérdidas$$

Luego:

$$Q_{final} = Q_{entrada} (1 - rL)$$

y

$$Pérdidas = Q_{entrada} \cdot rL$$

Al ser r un valor variable, se puede tomar para el cálculo un valor promedio entre el valor inicial $r_{entrada}$ correspondiente a $Q_{entrada}$ y un valor final, o este último si se quiere tener un margen de seguridad (Villón, 2003).

Ejemplo. Infiltración en canales

En un canal de sección trapezoidal de 7 km se desean conocer su eficiencia de conducción. Los datos del canal son los siguientes:

Suelo: franco arcilloso

Pendiente del 0.05 %

Caudal: 1 m³/seg

Talud del 1/1

Ancho de solera: 1 m

Tirante normal: 1.0168 mts

SOLUCION:

1. Ingreso los datos de forma del canal (sección y longitud)
Selecciono todo los tipos de constantes para revestimiento y
oprimo Calcular

Cálculo de Infiltraciones en canales

Datos de Entrada

Tirante: 1.016867 m

Caudal: 1.0 m³/s

Solera: 1.0 m

Talud: 1.0

Longitud: 7 km

Ingrese las const. en F(x) al revestimiento

Franco arcillosos

Tierra franco arcillosa

Suelo franco arcilloso

Suelos comunes (medios)

Franco arcilloso ordinario, limo

Calcular

Figura 8.5

El detalle de la solución se observa en la figura 8.6

Seleccione los valores que Usted considere mas convenientes a promediar

Pérdidas en m³/s-km

Fórmula	Pérd. (m ³ /s-km)
Ingham	0.007648
Etchevery	0.0117484
Pavlovski	0.002534
Davis-Wilson	0.0065941
Punjab	0.0200
Kostiakov	0.0022259
Moritz	0.0102037

Sel. los valores a promediar

☒ Ingham

☒ Etchevery

☐ Pavlovski

☐ Davis-Wilson

☒ Punjab

☒ Kostiakov

☒ Moritz

Promedio: 0.0103652

Caudal de salida: 0.9274 m³/s

Caudal correg.: 0.9263 m³/s

% de Pérdidas: 7.3666 %

Eficiencia: 92.6334 %

Evaluar

Figura 8.6

El criterio para tomar selección entre fórmulas es porque no todas dan de forma similar por lo que según el caso se seleccionan o las más se parezcan entre sí ó las que dan mayores valores (factor de seguridad)