Comportamiento de los factores de fricción de Manning y Darcy-Weisbach en diferentes condiciones de flujo e implicaciones en el diseño de canales de riego

Jorge Víctor Prado Hernández^{a,d}, Benjamín de León Mojarro^b, Mauricio Carrillo García^{c,d} y Óscar Gerardo Valentín Paz^{c,d}

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

Un problema frecuente en la operación de canales de riego de México es debido a su limitada capacidad de conducción que casi siempre resulta considerablemente inferior a la de diseño. Esta problemática se aborda mediante un análisis teórico-experimental de la resistencia al flujo en tres canales de riego de México a través de los factores de fricción de Darcy-Weisbach y de Manning, sujetos a distintas condiciones de flujo en régimen permanente gradualmente variado. Se encontró que el perfil de velocidades logarítmico asocia bien el factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach en distintas condiciones de flujo. El factor de fricción de Manning no mostró una tendencia definida, pero si alta sensibilidad a las condiciones de flujo; en uno de los canales estudiados su valor resultó 6.7% inferior al valor de diseño, en los otros dos resultó superior en un 20.0 % y 153.3 %. Estas variaciones repercuten de forma importante en la capacidad de conducción de los canales por lo que en su diseño se deben considerar las condiciones hidráulicas a las que estará sujeto y una ecuación tipo Darcy-Weisbach.

Palabras clave | Resistencia al flujo; diseño de canales; flujo en canales; canales de riego; capa límite.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de la superficie de riego en México se encuentra en los distritos de riego los cuales fueron construidos en la década de los sesenta del siglo pasado. El sistema de conducción y distribución está compuesto por canales a superficie libre de sección trapecial en su mayoría. Por lo general, los canales principales tienen revestimiento de concreto y su sección fue diseñada mediante la aplicación de la ecuación de resistencia de Manning (SRH, 1971a), válida para flujo permanente uniforme con régimen turbulento completamente desarrollado (Chow, 1959). Si bien, dicha ecuación es de carácter totalmente empírico y es in homogénea, se ha empleado para el diseño de canales de riego debido a que se cuenta con información experimental sobre los coeficientes de fricción de Manning para diferentes materiales (Chow, 1959; ASCE, 1963; Henderson, 1966; French, 1988). Sin embargo, aún ingenieros experimentados pueden asumir valores diferentes del coeficiente de fricción para un mismo tipo de recubrimiento y como resultado se dimensionan canales con capacidades de conducción superiores o inferiores a las de diseño (Burham y Davis, 1990). En efecto, el caudal (Q) que fluye por un canal es sensible a pequeñas variaciones del factor de fricción (n) ya que de la ecuación Manning (1) se observa claramente una relación inversa entre ambos parámetros:

$$Q = \frac{c_m}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2} A \tag{1}$$

^aProfesor-Investigador, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo (ypradohdez@gmail.com, ac12493@chapingo.mx)

^bCONAGUA. Estado de Zacatecas, Zacatecas, México. (felipe.deleon@conagua.gob.mx)

^cProfesor-Investigador, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo (<u>mauricio@correo.chapingo.mx</u>)

^dCarretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230, México.

donde C_m representa un factor de conversión igual a uno para el sistema internacional de unidades, e igual a 1.486 para el sistema inglés de unidades; R_h , el radio hidráulico [L]; S_0 , la pendiente del fondo del canal [adimensional]; y A, el área de mojado transversal al flujo [L²].

Para que la Ecuación (1) sea dimensionalmente homogénea y el caudal esté dado en dimensiones $[L^3 T^{-1}]$, el factor de fricción "n" debe tener dimensiones $[T L^{-1/3}]$ de dificil interpretación física por lo que algunos autores asumen que el factor C^m tiene dimensiones $[L^{1/3} T^{-1}]$ y por tanto el factor "n" no tiene dimensiones. Otros autores suponen que el numerador contiene la raíz cuadrada de la aceleración gravitacional y que el factor "n" tiene dimension $[L^{1/6}]$ (Aldama y Ocón, 2002; Venutelli, 2005).

Recientemente, algunos investigadores han intentado dar explicación del significado físico del coeficiente de fricción de Manning con el fin de elegir los valores adecuados para el diseño de canales de riego. Aldama y Ocón (2008) emplearon la teoría de la capa límite para tal efecto y encontraron los límites de aplicabilidad de la fórmula de Manning para canales circulares y rectangulares anchos. Para el cálculo de la velocidad media del flujo, emplearon la distribución logarítmica universal de velocidades del flujo turbulento hidráulicamente rugoso por ser este tipo de flujo donde tiene validez la ecuación de Manning. El perfil de velocidades empleado, fue definido como sigue (Schlichting, 1979):

$$\frac{v(y)}{v^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{k_c} \right) + B \tag{2}$$

donde v(y) es la velocidad en el sentido longitudinal del flujo (x) [L T^{-1}]; κ , Constante de Von Kármán e igual a 0.4 (Chow, 1959); k_s , la rugosidad equivalente de Nikuradse [L]; y, la coordenada transversal a la dirección del flujo [L]; B = 0.5 (Chow, 1959); $y v^*$, es la velocidad al cortante [L T^{-1}].

En su análisis asumieron que existe una capa de espesor αk_s adherida a la pared del canal en la que el agua tiene velocidad cero. Fue un razonamiento diferente al que habían abordado hasta entonces los investigadores puesto que no se consideraba la capa adherida a la pared (Keulegan, 1938, Schlichting, 1979). Por tanto, las velocidades medias del flujo para canales de sección circular y rectangular quedaron representadas, respectivamente por las Ecuaciones (3) y (4):

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{\pi \left(\frac{D}{2} - \alpha k_S\right)^2} \int_0^{\frac{D}{2} - \alpha k_S} v(y) \, 2 \, \pi \, r \, dr \tag{3}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{(h - \alpha k_s)} \int_{\alpha k_s}^{h} v(y) \, dy \tag{4}$$

donde v(y) se obtiene de la Ecuación (2); D, es el diámetro [L]; r, el radio [L]; h, el tirante del agua [L]. Para la sección circular el parámetro "y" de la Ecuación (2) se definió como D/2-r.

Con las Ecuaciones (3) y (4), y la relación

$$\frac{v^*}{V} = \sqrt{\frac{f}{8}}$$

se obtuvieron las expresiones para describir el factor de fricción "f" de la ecuación de Darcy-Weisbach, para canales de sección circular y rectangular, respectivamente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.035 \left(\frac{1 + 1.998 \,\alpha \frac{k_S}{D}}{1 - 2 \,\alpha \frac{k_S}{D}} \right) log \left(\frac{k_S}{D \left(1 - 2 \,\alpha \frac{k_S}{D} \right)} \right) + 1.679 \left(\frac{1 + 3.054 \,\alpha \frac{k_S}{D}}{1 - 2 \,\alpha \frac{k_S}{D}} \right)$$
(5)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\frac{a}{\left(1 - \alpha \frac{k_s}{h}\right)} \left[log\left(\frac{k_s}{h}\right) - c\left(\frac{k_s}{h}\right) \right] + d \tag{6}$$

donde a=2.035216917; c=0.049279011; d=2.121320344; y α=0.033373269, resultado de igualar a cero v(y) en la Ecuación (2).

Las Ecuaciones (5) y (6) representaron adecuadamente los resultados experimentales de varios investigadores para el rango de (ks/Rh) presentado en el diagrama de Moody (Moody, 1944), haciendo D=4 R_h para canal circular y $h=R_h$ para rectangular. Observaron una variación del factor de fricción "f" menor del 5% entre las Ecuaciones (5) y (6), lo que les hizo suponer, sin tener evidencias de secciones geométricas diferentes a la circular y rectangular, que la forma geométrica de la sección transversal de un canal no es determinante en el cálculo de la resistencia al flujo en canales. Los resultados les permitieron establecer que la fórmula de Manning es aplicable sólo en el rango (k_s/R_h) ϵ [0.0002, 0.2] y encontraron la ecuación siguiente para calcular el coeficiente de fricción:

$$n = 0.129765776 g^{-1/2} {\binom{k_s}{R_h}}^{1/6} R_h^{1/6}$$
 (7)

De acuerdo a la Ecuación (7) y sus límites de aplicabilidad los valores máximos del coeficiente de fricción "n" de Manning que tienen validez y sentido físico en los canales de riego de México, considerando que los canales grandes tienen R_h = 10 m; corresponden a concretos bien terminados.

Por otra parte, Martínez y Cabrera (2006), apoyados en las investigaciones de Talmaza, consideraron al parámetro κ de la Ecuación (2) como una variable puesto que observaron que depende de la cantidad de azolves, de la forma de los cauces y de la rugosidad de las paredes de la conducción, definiéndola como:

$$\kappa = 0.479\sqrt{f} + 0.314\tag{8}$$

Con la inclusión de la Ecuación (8) en la Ecuación (2), Martínez y Cabrera (2006) obtuvieron la ecuación

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\frac{\dot{a}}{\left(1 - \alpha \frac{k_s}{h}\right)} \left[log\left(\frac{k_s}{h}\right) - \dot{c}\left(\frac{k_s}{h}\right) \right] + \dot{d}$$
 (9)

donde \dot{a} =2.59249734; \dot{c} =0.049279011 y \dot{d} =1.01337. Encontraron que la Ecuación (9) representa mejor que la Ecuación (6) el factor de fricción de Manning para valores de "n" mayores a 0.032, representativos de canales de mampostería y de canales dragados en tierra (Chow, 1959; French, 1988).

Aun asumiendo que se ha elegido el factor de fricción de Manning correcto en el diseño de canales de riego en función de las características de terminado de sus paredes, su valor estará influenciado por la vegetación, irregularidad y alineamiento del canal, depósitos y socavaciones, obstrucciones, tamaño y forma del canal, nivel y caudal, estación del año, material suspendido y transporte de fondo (Chow, 1959; De Doncker et al., 2009). Esto implica, que transcurrido un tiempo de operación del canal el coeficiente de fricción aumentará y por tanto disminuirá la capacidad de conducción del canal. Además, existen muchos canales principales en los distritos de riego del Noroeste de México que tienen diques transversales al flujo (SRH, 1971b; SRH 1972) que provocan remansos y evitan que se tenga el tirante normal, reduciendo la capacidad de conducción de diseño como es el caso del canal principal del Valle de El Carrizo.

Por otro lado, no existe un análisis teórico o empírico que permita sugerir que el factor de fricción es insensible a la geometría del canal y que, por tanto, los resultados experimentales de conductos circulares y rectangulares de base ancha sean aplicables a secciones trapeciales (ASCE, 1963; Limerinos, 1970).

La incertidumbre existente acerca del comportamiento del factor de fricción de Manning en canales de riego de sección trapecial con revestimiento de concreto plantea la necesidad de realizar investigaciones de carácter teórico y experimental para establecer las medidas a considerar en su elección para el diseño de los conductos. Por tal motivo, en este trabajo se presenta un análisis, mediante la teoría de la capa límite, de resultados experimentales obtenidos de canales de sección trapecial con revestimiento de concreto. La mayor parte de la información fue recabada de un canal de laboratorio cuyo estado de conservación es de condiciones similares a los canales de riego de México recién construidos. También se consideró

información de dos canales principales típicos de los distritos de riego de México, ubicados en el centro y noroeste del país que operan desde las décadas de los setenta del siglo pasado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción de los canales experimentales

La mayor parte de la toma de información se realizó en un canal trapecial con revestimiento de concreto, ubicado en el laboratorio del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo (Canal de Chapingo). Tiene 53 metros de longitud, ancho de plantilla de 0.15 m, un talud 1:1 y una pendiente promedio de la rasante de 0.0005. El canal es alimentado por dos bombas eléctricas y el caudal se midió mediante un vertedor triangular.

Complementariamente se utilizó información de los canales principales de los distritos de riego de El Valle del Carrizo, Sinaloa y de la Begoña, Guanajuato, ambos de sección trapecial con revestimiento de concreto. El primero tiene un ancho de plantilla de 5.0 m, taludes de 1.5:1 y una pendiente del fondo promedio de 0.0005 m m⁻¹. El canal de la Begoña, corresponde a la margen derecha y tiene un ancho de plantilla de 1.2 m, taludes de 0.41:1 y una pendiente promedio de la rasante igual a 0.00067 m m⁻¹. Los caudales se midieron con molinete.

Pruebas realizadas

En los canales de Chapingo y La Begoña se seleccionaron varios tramos con pendientes de la rasante distintas. Se realizaron 65 pruebas en diferentes condiciones hidráulicas en régimen permanente gradualmente variado, variando caudales y tirantes en los tramos de canal seleccionados (Tabla 1).

Tabla 1 | Caudales v tirantes de las pruebas.

Canal	Tramo	Rango de caudales (l s ⁻¹)	Rango de tirantes de la sección 1 (m)	Rango de tirantes de la sección 2 (m)
Chapingo ^a	1	0.21 - 26.31	0.02 - 0.25	0.01 - 0.25
	2	0.10 - 23.12	0.01 - 0.18	0.01 - 0.19
	3	0.19 - 23.12	0.01 - 0.15	0.01 - 0.15
El Carrizo ^b	1	59 040.00 - 75 050.00	3.48 - 3.81	3.52 - 3.81
	1	400.00 - 600.00	0.70 - 1.00	0.70 - 1.14
La Begoña ^c	2	300.00	0.56	1.03
	3	200.00-300.00	0.27 - 1.04	0.44 - 0.45
	4	200.00-300.00	0.37	0.55

^a Pendientes del fondo del canal de 0.0001, 0.0019 y 0.0005 de los tramos 1, 2 y 3, respectivamente.

Obtención del coeficiente de fricción de Manning

El coeficiente de fricción de Manning se obtuvo indirectamente, a partir de la aplicación del principio de conservación de la energía para un fluido ideal entre dos secciones del canal. Dicho principio, a saber, establece que (Sotelo, 2009) V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

^b Pendiente del fondo del canal de 0.0005.

^c Pendientes de 0.00067, 0.00067, 0.00067 y 0.001 de los tramos 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

$$h_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2a} + Z_1 = h_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2a} + Z_2 + h_{f_{1-2}}$$
 (10)

donde los subíndices 1 y 2 denotan las secciones 1 y 2, respectivamente; h, el tirante [L]; α , el coeficiente de distribución de velocidad y se utilizó $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.0$ (Marengo y Arreguín, 2008); g, la aceleración gravitacional [L T⁻²]; Z, la cota del fondo del canal [L]; v, la velocidad media [L T⁻¹]; Rh es el radio hidráulico [L]; y hf₁₋₂ representa las pérdidas de energía debido a la fricción en el tramo comprendido entre las secciones 1 y 2 [L].

Con las pérdidas de energía hf_{1-2} obtenidas mediante la Ecuación (10), se calculó la pendiente de energía $S_{\rm f}$, con la ecuación siguiente

$$S_f = {h_{f_{1-2}} \choose L} = {1 \over 2} (S_{f1} + S_{f2})$$
 (11)

donde L es la longitud del tramo comprendido entre las secciones 1 y 2.

5

Las pendientes de energía Sf_1 y Sf_2 de la Ecuación (11) se calcularon con la ecuación de resistencia de Manning como sigue (Chow, 1959):

$$S_{f1} = \left(\frac{v_1 n}{c_m R_{h_1}^{2/3}}\right)^2 \tag{12a}$$

$$S_{f2} = \left(\frac{v_2 \, n}{c_m \, R_{h_2}^{2/3}}\right)^2 \tag{12b}$$

obteniéndose el coeficiente de fricción "n" [T L^{-1/3}] (Marengo y Arreguín, 2008):

$$n = C_m \left[\frac{2 \, S_f}{v_1^2 \, R h_1^{-4/3} + v_2^2 \, R h_2^{-4/3}} \right]^{1/2} \tag{13}$$

en la que C_m se define igual que en la Ecuación (1).

Valor teórico del factor de fricción f de la ecuación de Darcy-Weisbach

Los valores de referencia del factor de fricción "f" de la ecuación de Darcy-Weisbach se obtienen de la utilización del perfil de velocidades para flujo turbulento hidráulicamente rugoso, descrito mediante la Ecuación (2) en la que la velocidad al cortante se define como

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \tag{14}$$

donde τ_0 [F L⁻²] es el esfuerzo cortante en la pared (Chow, 1959), definido como:

$$\tau_0 = \rho \, g \, R_h \, S_f \tag{15}$$

en la que ρ es la densidad del agua [F L⁻⁴ T²]; g, la aceleración gravitacional [L T⁻²]; R_h, el radio hidráulico [L]; S_f, la pendiente de energía [adimensional].

Con la finalidad de establecer una relación entre los factores de fricción de Manning y el factor de fricción "f" de Darcy-Weisbach, se combina la siguiente ecuación

$$V = \left(\frac{8 g R_h S_f}{f}\right)^{1/2} \tag{16}$$

con las Ecuaciones (14) y (15), y se obtiene

$$\frac{v^*}{V} = \sqrt{\frac{f}{8}} \tag{17}$$

donde v es la velocidad promedio del flujo [L T⁻¹].

De igual forma como lo supusieron Aldama y Ocón (2002), se asumió que hay una capa adyacente a las paredes del canal con un espesor αk_s en la que la velocidad del agua es cero, por lo que la velocidad media del fluido para un flujo turbulento completamente desarrollado está dada por la ecuación

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{1}{b(h - \alpha k_S) + m(h - \alpha k_S)^2} \int_{\alpha k_S}^{h} v(y) T(y) dy$$
 (18)

donde h es el tirante del agua [L]; v(y), la velocidad del agua a una altura "y" del fondo del canal $[L T^{-1}]$, dada por la Ecuación (2); T(y), el ancho de la superficie libre del agua a una altura "y" del fondo del canal [L]; b, el ancho del canal [L] (Figura 1).

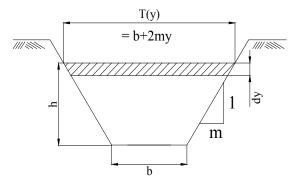


Figura 1 | Sección de un canal trapecial.

El resultado de la Ecuación (18) se relacionó con la Ecuación (17) y se obtuvo una ecuación que describe el comportamiento teórico del factor de fricción "f" de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{\left[m(h-\tilde{g}\,k_S)^2 + b(h-\tilde{h}\,k_S)\right]} \begin{bmatrix} \tilde{a}\,b\,h + \tilde{b}\,b\,k_S + \tilde{c}\,m\,h^2 + \tilde{d}\,m\,k_S^2 + \\ + \tilde{e}\,b\,h\,\ln\left(\frac{h}{k_S}\right) + \tilde{f}m\,h^2\,\ln\left(\frac{h}{k_S}\right) \end{bmatrix}$$
(19)

donde $\tilde{a}=2.12132;\,\tilde{b}=0.02949;\,\tilde{c}=2.56326;\,\tilde{d}=0.00049;\,\tilde{e}=0.88388;\,\tilde{f}=0.88388;\,\tilde{g}=0.03337\,\mathrm{y}\,\,\tilde{h}=0.03337.$

Valor experimental del factor de fricción f de la ecuación de Darcy-Weisbach

Con la información de la rugosidad del material de la pared del canal (k_s) y de los diámetros hidráulicos (D_h) de las pruebas de laboratorio, se obtuvo el factor de fricción de Darcy-Weisbach, aplicando la ecuación de Prandtl-von Kármán para flujo turbulento hidraúlicamente rugoso, definida como (Saldarriaga, 2007):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \left(\frac{D_h}{k_c}\right) + 1.14$$
 (20)

obtenida para conductos circulares, aplicando el perfil de distribución de velocidades de la Ecuación (2), sin considerar una capa de fluido adyacente a las paredes con velocidad cero.

Considerando que D_h = 4R_h, la Ecuación (20) se escribe como

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log \left(\frac{R_h}{k_c}\right) + 2.3441 \tag{21}$$

7

Keulegan modificó los coeficientes de la Ecuación (21) para representar resultados experimentales de un canal trapecial como sigue (ASCE, 1963):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.03 \log \left(\frac{R_h}{k_s}\right) + 2.2104 \tag{22}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se confirma que la geometría de la sección del canal no tiene un efecto importante en el cálculo en la resistencia al flujo como lo supusieron Aldama y Ocón (2002) como se observa en las Figuras 2 y 3 en las que los factores de fricción "f" de los resultados experimentales correspondientes a canales de sección trapecial se ajustan de forma aceptable a las tendencias teóricas para canales de sección trapecial (Ecuación 19), rectangular (Ecuación 6) y en consecuencia a la circular (Ecuación 5), según el análisis efectuado por Aldama y Ocón (2002); por tanto se justifica el uso de la Ecuación (7) para identificar los límites de aplicabilidad del factor de fricción de Manning en canales de sección trapecial. En efecto, las tendencias teóricas de las secciones trapecial y rectangular se traslapan en el rango (k_s/R_h) ϵ [0.01, 0.2] y se tiene una diferencia máxima de 13% en el extremo izquierdo del rango (k_s/R_h) ϵ [0.0006, 0.01). La tendencia teórica propuesta por Martínez y Cabrera (2006) mediante la Ecuación (9) tiene ajuste aceptable (diferencias menores del 5%) a las tendencias teóricas de las secciones rectangular y trapecial sólo en el rango (k_s/R_h) ϵ [0.002, 0.02], correspondientes a factores de fricción "f" inferiores de 0.035, comportamiento explicable debido a que el parámetro κ del perfil de velocidades logarítmico de la Ecuación (2) fue propuesto en función de observaciones realizadas en corrientes de rugosidades fuera del límite de validez encontrado por Aldama y Ocón (2002).

La coincidencia de las tendencias teóricas del factor de fricción "f" entre la sección rectangular y trapecial de las figuras 2 y 3 se satisface solamente para canales rectangulares suficientemente anchos. En efecto, las tendencias teóricas mostradas para canales rectangulares corresponden para b/h > 3.5, donde "b" es el ancho de plantilla y "h" es el tirante, de manera que se puede considerar que el radio hidráulico es igual al tirante ya que para esta relación de b/h el efecto del esfuerzo cortante de las paredes laterales es menor del 30% del esfuerzo cortante total producido por el perímetro de mojado (Lashkar y Fathi, 2010).

De las Figuras 2 y 3 se observa que los valores experimentales del factor de fricción "f" obtenidos mediante la Ecuación (22) se ajustaron mejor a la tendencia teórica, representada por la Ecuación (19), que los obtenidos mediante la Ecuación (21); resultado explicable debido a que Keulegan modificó los coeficientes de la Ecuación (21) para representar resultados experimentales en canales de sección trapecial (ASCE, 1963). Por tanto, se desprende que la Ecuación (19) representa adecuadamente el comportamiento del factor de fricción sin necesidad de modificar los coeficientes a ,b ,c ,d ,e ,f ,g y h .

Los datos experimentales de la Figura 3 tienen una diferencia máxima de 22% respecto a los valores teóricos de "f" de las secciones rectangular (Ecuación 6) y trapecial (Ecuación 19); pero es oportuno aclarar que dicha diferencia máxima corresponde a números de Reynolds típicos de flujo de transición entre el laminar y el turbulento (Sotelo, 2009), como era de esperarse debido a que la Ecuaciones (6) y (19) son válidas para flujo turbulento. Sin considerar los datos de flujo transicional, la diferencia máxima es menor del 8% que resulta en un error aceptable de diseño de la capacidad de conducción de canales de riego. Para cuantificar este error la ecuación de Darcy-Weisbach se escribe como sigue (Sotelo, 2009):

$$Q = 1.11 \frac{1}{\sqrt{f}} g^{1/2} D_h^{5/2} S_f^{1/2}$$
 (23)

donde Q representa el caudal [L^3 T⁻¹]; f, el factor de fricción [adimensional]; g, la aceleración gravitacional [L T⁻²]; D_h , el diámetro hidráulico [L]; y S_f , la pendiente de fricción [adimensional].

Del análisis del comportamiento del cociente $1/\sqrt{f}$ de la Ecuación (23) resulta que una sobreestimación de 8% del factor de fricción "f" genera una reducción de 3.8% en el caudal de conducción, mientras que una subestimación del mismo valor produce un aumento de 4.3% del caudal.

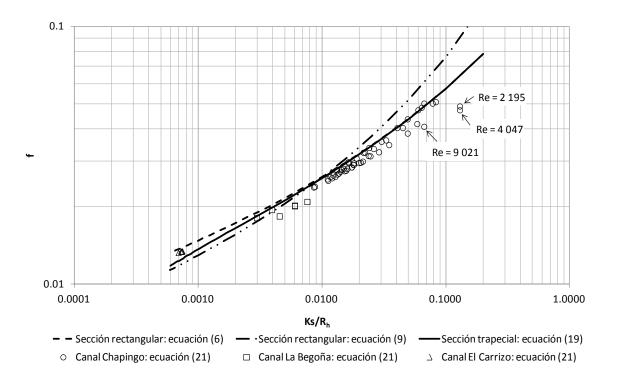


Figura 2 | Comparación del factor f obtenido con la Ecuación (21) con las tendencias teóricas para secciones rectangular y trapecial.

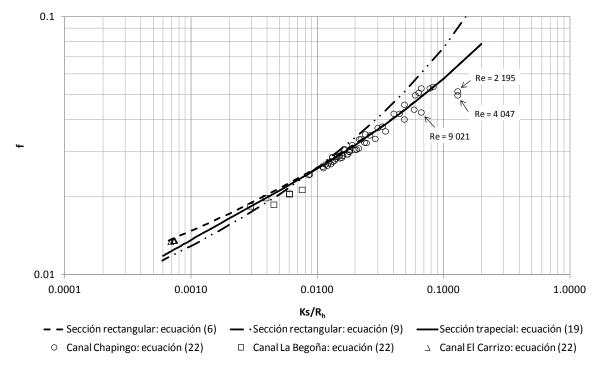


Figura 3 | Comparación del factor f obtenido con la Ecuación (22) con las tendencias teóricas para secciones rectangular y trapecial.

La tendencia del factor de fricción "n" de la ecuación de Manning resultó similar a los resultados obtenidos por otros autores (Chow, 1959; ASCE, 1963, Marengo y Arreguín, 2008) ya que no se observó alguna tendencia bien definida entre el caudal, el tirante y la relación k_s/R_h con el factor "n" (Figuras 4 a 6). El valor de "n" es sensible a las condiciones de flujo ya que difiere para valores similares de caudal o tirante por lo que para el análisis que se realiza se obtuvieron los valores promedios de

9

los canales experimentales; de 0.014, 0.018 y 0.031 para los canales de Chapingo, El Carrizo y La Begoña, respectivamente (Figura 6). Destaca que el valor promedio de "n" del canal de Chapingo resultó igual al valor sugerido para el diseño de canales de riego en México con revestimiento de concreto (SRH, 1971a) por lo que se puede establecer que las condiciones de rugosidad de las paredes del canal experimental son representativas de la de los canales de riego con revestimiento de concreto recién construidos. En el Canal La Begoña es notable la diferencia entre el valor promedio medido (0.031) y el utilizado en su diseño (0.015), la cual se debe a la presencia de azolves y deterioro de las paredes del canal y a que las condiciones actuales de operación producen un estado hidráulico totalmente distinto al régimen permanente uniforme.

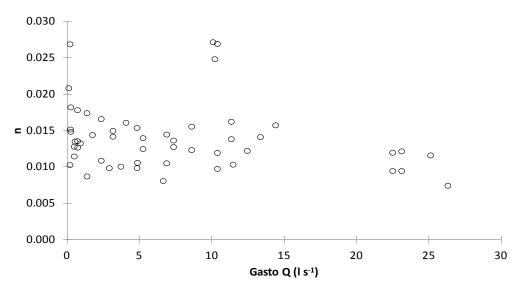


Figura 4 | Relación caudal-factor de fricción de Manning del Canal Chapingo.

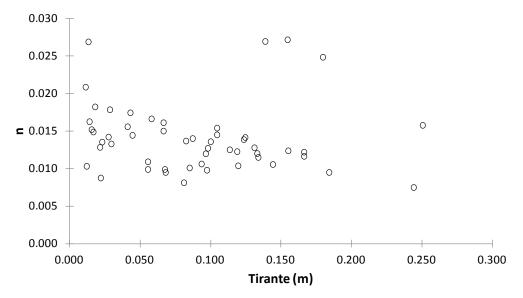


Figura 5 | Relación tirante-factor de fricción de Manning del Canal Chapingo.

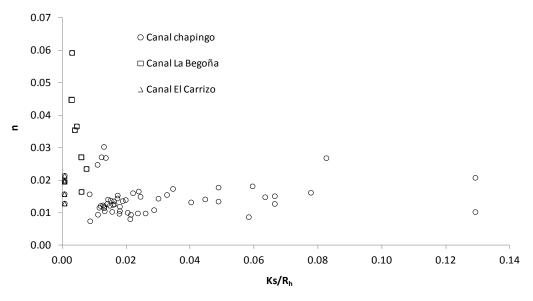


Figura 6 | Relación K_s/R_h - factor de fricción de Manning de los canales experimentales.

La desviación estándar del factor "n" del canal Chapingo es 0.0045 que representa una diferencia de 32%, respecto al valor promedio observado (0.014). Al incrementar un 32% el valor del factor "n", de acuerdo a la ecuación de Manning habrá una disminución de 24% en la capacidad de conducción del canal, comportamiento que explica la reducción de la capacidad de conducción de diseño del canal El Carrizo de 100 m³ s⁻¹ a un valor máximo actual de 73 m³ s⁻¹. Este razonamiento es sustentable puesto que si se toma en cuenta que el canal de Chapingo está en buen estado de conservación y que su valor promedio medido de "n" es similar al considerado en el diseño del canal El Carrizo (n=0.015), un incremento de 32% en el factor de fricción resultaría en el valor promedio de "n" medido en el canal El Carrizo (n=0.018). El incremento del valor del factor de fricción del canal El carrizo se debe a la condición de régimen permanente no uniforme provocado por la presencia de diques transversales en la dirección del flujo; se producen curvas remanso que evitan alcanzar el tirante normal, condición similar a la de las pruebas realizadas en el canal del laboratorio de Chapingo.

CONCLUSIONES

La geometría de la sección transversal no influye en la estimación de la resistencia al flujo en canales y puede ser representada de forma adecuada por el radio hidráulico, siempre que su sección transversal sea lo suficientemente ancha para despreciar los efectos rugosos de las paredes laterales. El factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach se representa con precisión aceptable mediante relaciones funcionales derivadas de un análisis teórico, aplicando la teoría de la capa límite de Prandtl-Von Kármán con adecuaciones a los límites de integración clásicos del perfil de velocidades logarítmico de flujo turbulento hidráulicamente rugoso.

El factor de fricción de Manning es muy sensible a las condiciones del flujo que se presentan cuando las fuerzas de fricción y de gravedad no están en equilibrio, situación muy frecuente en canales de riego en operación, donde además de estas fuerzas intervienen las de presión e inercia.

Por el contrario, el factor de fricción de Manning es difícil estimar por el carácter empírico de la ecuación; no presenta una tendencia definida porque es sensible a las condiciones de flujo por lo que se puede incurrir en graves errores de diseño de la capacidad de conducción si no se analizan las condiciones de flujo a las que estará sujeto el canal.

Los canales de riego de México se diseñaron con la ecuación de Manning que es válida para flujo permanente uniforme en régimen turbulento completamente desarrollado. Muchos de estos canales tienen problemas para conducir el caudal de diseño debido a que las condiciones de flujo en que operan son totalmente distintas a las concebidas originalmente. Por tanto, para el diseño debe considerarse las condiciones hidráulicas provocadas por las características propias de la operación de los canales, así como el efecto ocasionado por distintos tipos de estructuras como sifones, represas y diques y debe plantearse la conveniencia de usar la ecuación de Darcy-Weisbach.

REFERENCIAS

Aldama-Rodríguez, A. A., Ocón. A. R. 2002. Resistencia al flujo en canales y límites de aplicabilidad de la fórmula de Manning. *Ingeniería Hidráulica en México* 17(1), 107-115.

ASCE (ASCE Task Force on Friction Factors in Open Channels). 1963. Friction factors in open channels, *Journal Hydraulics Division*, ASCE 89, 97–143.

Burhan M. W., Davis, D. W. 1990. Effects of data errors on computed steady flow profiles. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 116(7), 914-929. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:7(914)

Chow, V.T. 1959. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York, USA.

De Doncker L., Troch, P., Verhoeven, R., Bal, K., Meire, P., Quintelier, J. 2009. Determination of the Manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river. *Environmental Fluid Mechanics* 9, 549-567. doi:10.1007/s10652-009-9149-0

French, R. H. 1988. Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill. México. 723 p.

Henderson, F. M. 1966. Open Chanel Flow. Macmillan. Nueva York, USA.

Keulegan, G. H. 1938. Laws of turbulent flow in open channels. Journal National Bureau of Standards 21, 707-741.

Lashkar A. B., Fathi, M. M. 2010. Wall and bed shear forces in open channels. *Research Journal of physics* 4(1), 1-10. doi:10.3923/rjp.2010.1.10

Limerinos J. T. 1970. Determination of the Manning Coefficient From Measured Bed Roughness in Natural Channels. Geological Survey Water-Supply paper 1898-B. U. S. Department of the interior. Washington, USA. Obtenido de https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp1898B

Marengo-Mogollón, Cortés-Cortés, C., Arreguín-Cortés, F. I. 2008. Análisis hidráulico experimental en túneles de conducción en sección baúl trabajando como canal considerando rugosidades compuestas. *Ingeniería Hidráulica en México* 23(1), 21-44.

Martínez-González, Y., Cabrera-Estupiñán, E. 2006. Consideraciones sobre la resistencia al flujo en canales. Estudio de caso: canal experimental del CIH. *Ingeniería Hidráulica en México* 21(4), 87-101.

Moody, L. F. 1944. Friction factors for pipe flow. Transactions of American Society of Mechanical Engineers (A.S.M.E), June 19-22, Pittsburgh, Pa, USA, 671-684.

Oertel, H. 2004. *Prandtl's Essentials of Fluid Mechanics*. Applied mathematical sciences, vol. 158. 2^a ed. Antman, S. S., Marsden, J. E., Sirovich, L. (Eds). Springer-Verlag New York, Inc. New York, USA. 723 p.

Saldarriaga-V, J. G. 2007. Hidráulica de tuberías. Alfaomega. Colombia. 690 p.

Schlichting, H. 1979. Boundary layer theory. McGraw-Hill. Nueva York, USA. 817 p.

Soong, D. T., Prater, C. D., Halfar, T. M., Wobig, L. A. 2012. *Manning's roughness coefficient for Illinois streams*. U.S. Geological Survey Data Series 668, 14 p. Obtenido de https://pubs.usgs.gov/ds/668/

Sotelo-Ávila, G. 2009. *Hidráulica de canales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. D. F. México. 836 p.

- S. R. H. (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1971a. *Proyecto de Zonas de Riego*. Dirección de Proyectos de Grande Irrigación, Departamento de Canales. D.F., México.
- S. R. H. (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1971b. *Anexo de Planos del proyecto Río Sinaloa-Costa de Hermosillo*. Programa de acción inmediata estudio de factibilidad. Archivo Histórico del Agua, D. F., México.
- S. R. H. (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1972. *Memoria segunda parte del Plan Hidráulico del Noroeste*. Programa de acción inmediata estudio de factibilidad. Archivo Histórico del Agua, D. F., México.

Venutelli, M. 2005. A Constitutive Explanation of Manning's Formula. Mecanica 40, 281-289. doi:10.1007/s11012-005-6529-5