Fundamentos de Conservación de suelos y aguas IV

Diseño de ingeniería en el cálculo de variables hidráulicas en canales parabólicos ($y=a*x^2$, $a>1$) con vegetación ajustados en su tamaño, tirante y coeficiente de rugosidad correctos

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela Ingeniería Agrícola

Autores:
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

Diciembre del 2025

Dedicatoria y agradecimiento

A Dios sobre todas las cosas que es el dador de vida y de toda buena dádiva

A nuestras familias que siempre nos han apoyado en todo momento

A los estudiantes Oscar Eduardo Rodríguez Cascante, Anthony Dariel Valverde Tames y al Melany Nicole Vega Masis que tuvieron una actividad muy fuerte y meritoria en la confección de esta publicación o libro que está en servicio a nivel tanto nacional como internacional como un insumo que facilita el diseño de ingeniería en canales conductores de agua en conservación de suelos en pendientes.

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Índice General

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Índice de figuras

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Índice e cuadros

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Variables que se presentan en un canal conductor de agua con forma parabólica y variables a tomar en cuenta para corrección de los diseños en canales o vías de agua con vegetación

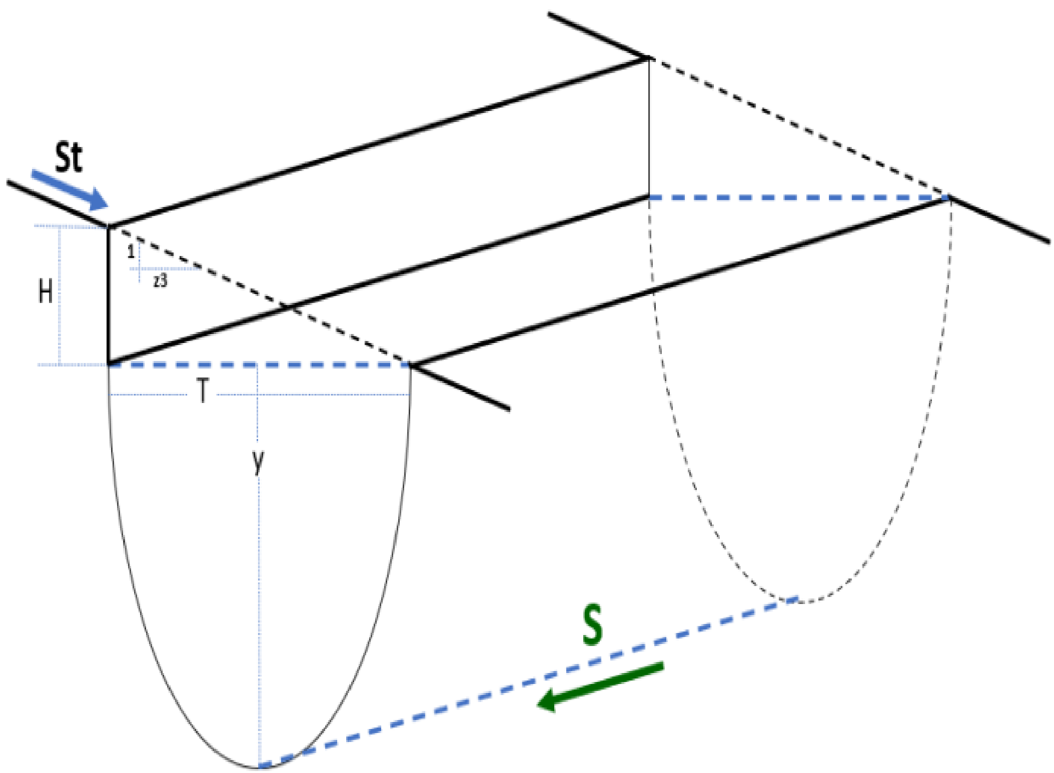

Figura No. 1 Canal o acequia de ladera con forma parabólica

Según se observa la imagen tenemos los siguientes parámetros:
z3 = talud natural que se forma debido a la pendiente del terreno (adimensional)
y = tirante de agua que corresponde a la mayor profundidad de agua en la acequia de ladera triangular (m)
T = ancho del espejo de agua en el canal en la sección transversal de la acequia de ladera triangular
St = pendiente del terreno (%)
S = pendiente del canal (m/m)
H = altura desplazada en la pendiente

Se confeccionan diseños de canal parabólico con sus correcciones con respecto al tamaño y esto es debido a que son revestidos con diferentes tipos de vegetaciones llamados canales o vías de agua empastados, pero de diferentes portes densidad y altura, lo cual produce un aumento en el coeficiente de rugosidad que disminuye la velocidad del agua en el canal y aumenta el tirante o nivel de agua máximo en el canal o vía de agua (Figuras 1 y 2).

La forma de las ecuaciones que representan los canales parabólicos es **f(x) = y = a*x^2** donde se utilizarán los valores de **a = 1,5 $= \frac{3}{2}$; a = 2,5 $= \frac{5}{2}$ y a = 3** para los diferentes canales y\o diferentes ecuaciones.

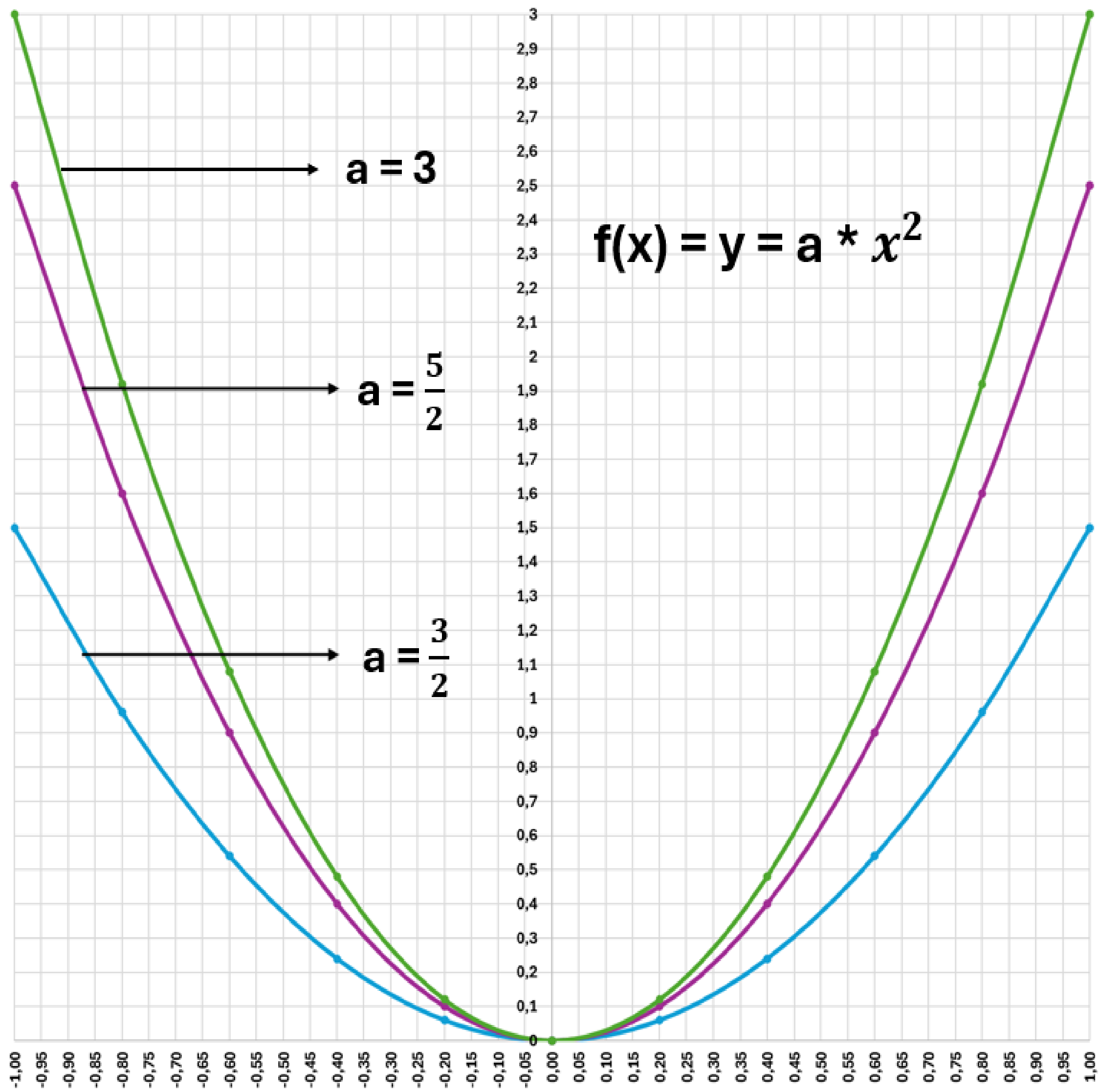

Figura 2: Canales a diseñar con sus correcciones

Para considerar los valores de coeficiente de rugosidad según porte y densidad de la vegetación en los canales se tomarán los valores de clasificación del desarrollo y porte de la vegetación que se presenta en los canales de manera natural y se muestran en la figura “3” y del coeficiente de rugosidad “n” de la figura “4”.

Se tomarán del libro “HANDBOOK OF CHANNEL DESIGN FOR SOIL AND WATER CONSERVATION” cuya dirección electrónica es “https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/75242/dot_75242_DS1.pdf” las figuras 3 y 4 y sus continuaciones para realizar los ajustes en los diseños e ingeniería de los canales parabólicos que se verán en este libro

Note: Covers classified have been tested in experimental channels.
Covers were green and generally uniform.

Retardance	Cover	Condition
A	Weeping lovegrass	Excellent stand, tall, (average 76.2 centimeters)
	Yellow bluestem Ischaemum	Do tall, (average 91.4 centimeters)
B	Kudzu	Very dense growth, uncut
	Bermudagrass	Good stand, tall, (average 30.5 centimeters)
	Native grass mixture (little bluestem, blue grama, and other long and short midwest grasses)	Good stand, unmowed
	Weeping lovegrass	Good stand, tall, (average 61.0 centimeters)
	Lespedeza sericea	Good stand, not woody, tall (average 48.3 cent.)
	Alfalfa	Good stand, uncut, (average 27.9 centimeters)
	Weeping lovegrass	Good stand, mowed, (average 33.0 centimeters)
	Kudzu	Dense growth, uncut
	Blue grama	Good stand, uncut, (average 33.0 centimeters)
C	Crabgrass	Fair stand, uncut (25.4 to 121.9 centimeters)
	Bermudagrass	Good stand, mowed (average 15.2 centimeters)
	Common lespedeza	Good stand, uncut (average 27.9 centimeters)
	Grass-legume mixture--summer (orchard grass, redtop, Italian ryegrass, and common lespedeza)	Good stand, uncut (15.2 to 20.3 centimeters)
	Centipedegrass	Very dense cover (average 15.2 centimeters)
	Kentucky bluegrass	Good stand, headed (15.2 to 30.5 centimeters)
D	Bermudagrass	Good stand, cut to 6.4-centimeter height
	Common lespedeza	Excellent stand, uncut (average 11.4 centimeters)
	Buffalograss	Good stand, uncut (7.6 to 15.2 centimeters)
	Grass-legume mixture--fall, spring (Orchardgrass, redtop, Italian ryegrass, and common lespedeza)	Good stand, uncut (10.2 to 12.7 centimeters)
	Lespedeza sericea	After cutting to 5.1-centimeter height. Very good stand before cutting.
E	Bermudagrass	Good stand, cut to 3.8 centimeters
	Bermudagrass	Burned stubble.

Figura 3: Clasificación según la altura de la vegetación en las vías de agua o canales conductores de agua

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

-Guide to selection of vegetal retardance

Stand	Average length of vegetation	Degree of retardance
Good......	Longer than 76.2 cm.	A
	27.9 to 61.0 cm.	B
	15.2 to 25.4 cm.	C
	5.1 to 15.2 cm.	D
	Less than 5.1 cm.	E
Fair......	Longer than 76.2 cm.	B
	27.9 to 61.0 cm.	C
	15.2 to 25.4 cm.	D
	5.1 to 15.2 cm.	D
	Less than 5.1 cm.	E

Continuación de figura 3

Grado	Promedio de altura de la planta (cm)
A	75
B	25 - 60
C	15 - 25
D	5 - 15
E	5

Grado de retardatividad	Condición
A. Muy Alto	Excelentemente establecido (promedio 75 cm de alto) 7 Excelentemente establecido (90) cm. de altura promedio
B. Alto	Crecimiento denso sin cor. Bien establecido, alto (30 cm. promedio) Bien establecida, sin segar Bien establecido (60 cm alto' promedio) Bien establecida, no leñosa, alta (50 cm. Promedio) Bien establecida, sin cor- tar (28 cms. promedio) Bien establecida, segada (33 cm. promedio) Bien establecida, sin cortar (33 cms. promedio)
C. Moderado	Bien establecido, segado (15 cm. promedio) Bien establecida, sin cor- tar (28 cms. promedio) Bien establecida sin cortar (15 a 20 cm) Bien esta. floreciente (15 a 30)
D. Bajo	Bien esta. cortando a 7.5 alto Muy bien esta. 19 cm. de alt. Bien esta. sin cor. 7.5 a 15 cm. Bien esta. sin cor. (10 a 12 cm) Muy bien esta. cortada a 5 cm.
E. Muy Bajo	Bien esta. cortado a 5 cm. Altura Quemado

Continuación de figura 3

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

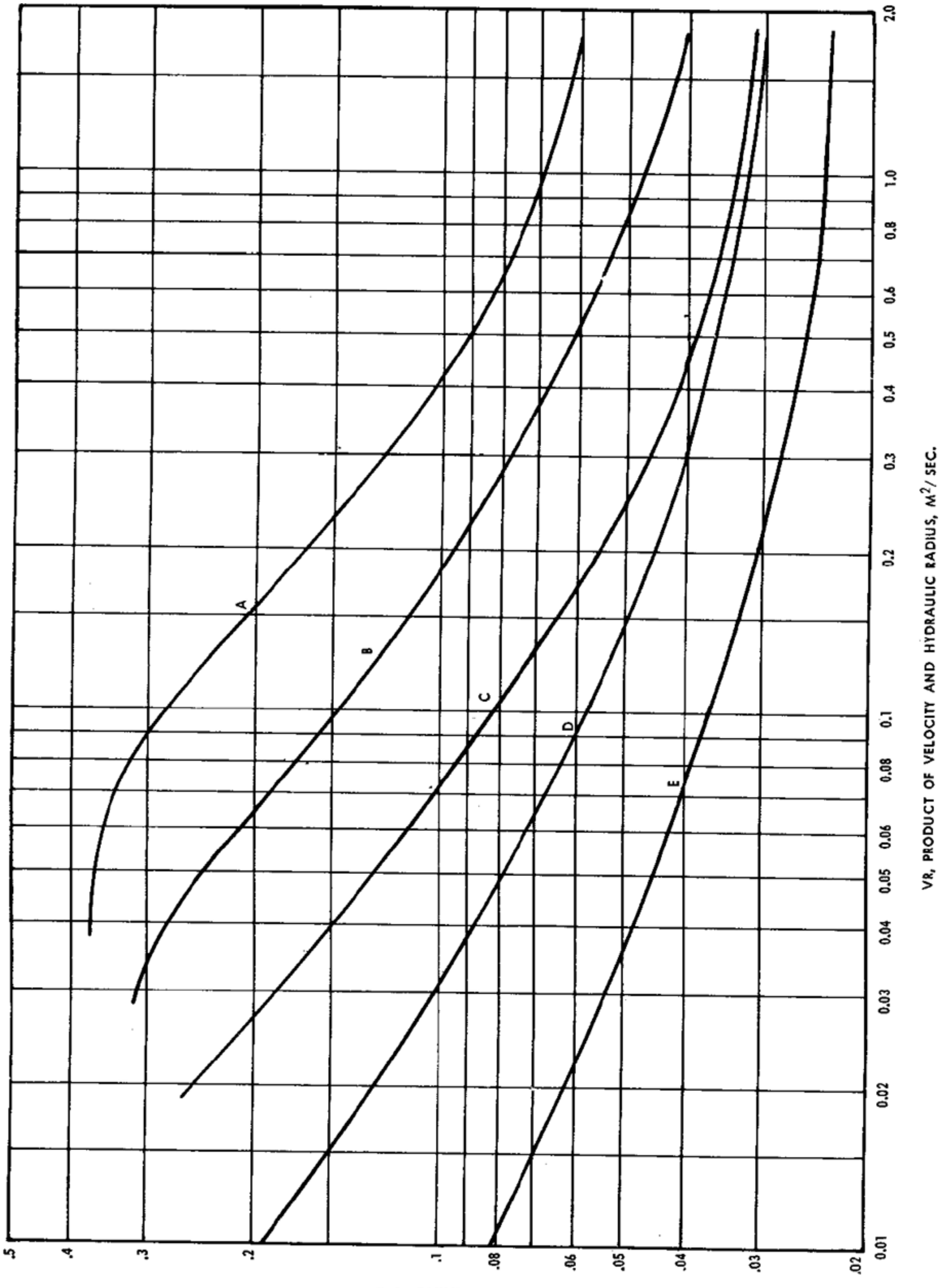

Figura 4: Valores de “n” según la altura de los pastos en las vías o canales conductores de agua que están empastados

-Permissible canal velocities after aging; for channels with linings other than vegetation[1]

Original material excavated	Clear water, no detritus	Water transporting colloidal silts	Water transporting noncolloidal silts, sands, gravels, or rock fragments
	meters per sec.	meters per sec.	meters per sec.
Fine sand, noncolloidal....................	0.457	0.762	0.457
Sandy loam, noncolloidal..................	0.533	0.762	0.610
Silt loam, noncolloidal....................	0.610	0.914	0.610
Alluvial silts, noncolloidal..............	0.610	1.067	0.610
Ordinary firm loam.........................	0.762	1.067	0.686
Volcanic ash................................	0.762	1.067	0.610
Fine gravel..................................	0.762	1.524	1.143
Stiff clay, very colloidal................	1.143	1.524	0.914
Graded, loam to cobbles, noncolloidal......	1.143	1.524	1.524
Alluvial silts, colloidal.................	1.143	1.524	0.914
Graded, silt to cobbles, colloidal.........	1.219	1.676	1.524
Coarse gravel, noncolloidal...............	1.219	1.829	1.981
Cobbles and shingles......................	1.524	1.676	1.981
Shales and hardpans.......................	1.829	1.829	1.524

[1]Recommended in 1926 by Special Committee on Irrigation Research, American Society of Civil Engineers.

Although not specifically stated in the original recommendations, these values apply only to channels with mild bed slopes.

Continuación de figura 4

-Permissible velocities for channels lined with vegetation[1]
The values apply to average, uniform stands of each type of cover.

Cover	Slope range[2]	Permissible velocity: Erosion resistant soils	Permissible velocity: Easily eroded soil
	Percent	Meters per sec.	Meters per sec.
Bermudagrass	0-5	2.438	1.829
	5-10	2.134	1.524
	over 10	1.829	1.219
Buffalograss, Kentucky bluegrass, Smooth brome, Blue grama	0-5	2.134	1.524
	5-10	1.829	1.219
	over 10	1.524	0.914
Grass mixture	[2]0-5	1.524	1.219
	5-10	1.219	0.914
Lespedeza sericea, Weeping lovegrass, Yellow bluestem, Kudzu, Alfalfa, Crabgrass	[3]0-5	1.067	0.762
Common lespedeza[4], Sudangrass[4]	[5]0-5	1.067	0.762

[1]Use velocities exceeding 1.524 meters per second only where good covers and proper maintenance can be obtained.

[2]Do not use on slopes steeper than 10 percent except for side slopes in a combination channel.

[3]Do not use on slopes steeper than 5 percent except for side slopes in a combination channel.

[4]Annuals--used on mild slopes or as temporary protection until permanent covers are established.

[5]Use on slopes steeper than 5 percent is not recommended.

Continuación de figura 4

Diseño de canal parabólico con a = $1,5 = \frac{3}{2}$

La función matemática que representa el canal es $y = \frac{3}{2}x^2$ y el canal se representa en la figura 5.

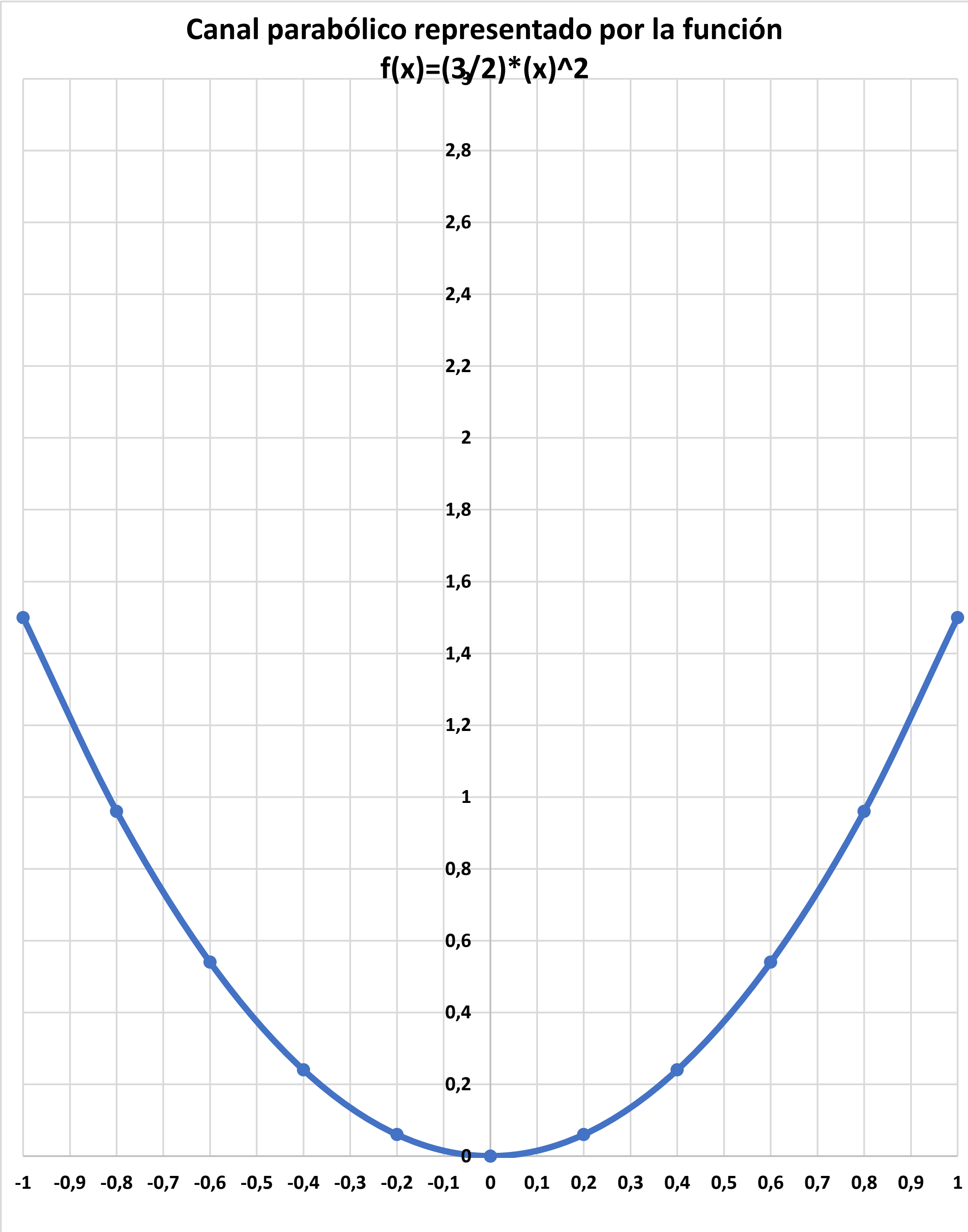

Figura 5: Canal parabólico para la ecuación $y = \frac{3}{2}x^2$

Calculando “f” para establecer las ecuaciones en una sola variable

$$f = \frac{2}{\sqrt{a}}$$

$$f = \frac{2}{\sqrt{\frac{3}{2}}}$$

$$f = \frac{2}{\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}}$$

$$f = 2 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$f = 2 * \frac{\sqrt{2} * \sqrt{3}}{\sqrt{3} * \sqrt{3}}$$

$$f = 2 * \frac{\sqrt{6}}{3}$$

$$\boldsymbol{f = \frac{2\sqrt{6}}{3}}$$

Lo cual nos indica que la relación matemática entre **“T”** y **“y”** queda definida de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{T = f * \sqrt{y}}$$

$$\mathbf{T} = \boldsymbol{\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

Para el cálculo de las áreas y volúmenes de corte primeramente se expresará en términos del espejo de agua **“T”** y el tirante **“y”** para luego calcular dichas áreas según la función matemática específica que representa el canal conductor de la acequia de ladera expresando las Ecuaciones de las variables hidráulicas de **Ac1**, **Ac2**, **P** y **R** en función de **“y”**

El cálculo del área hidráulica que es la misma que el área de corte 1 “Ac1”:

$$\boldsymbol{Ac1 = \frac{2T * y}{3}}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = \frac{2 * \left(\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}\right) * y}{3}}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = \frac{\frac{4\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{3}{2}}}{3}}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = \frac{4 * \sqrt{6}}{9} * y^{\frac{3}{2}}}$$

Cálculo del área de corte 2 “Ac2”:

$$\boldsymbol{A_{c2} = \frac{T^2 * S_t}{200}}$$

$$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$A_{c2} = \frac{T^2 * S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{\left(\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}\right)^2 * S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{\frac{8}{3} y * S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{8 * y * S_t}{3} * \frac{1}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{8 * y * S_t}{3 * 200}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$A_{c2} = \frac{8 * y * S_t}{600}$$

$$\mathbf{A_{c2} = \frac{S_t y}{75}}$$

Calculando el área de corte total:

$$A_{cT} = A_{c1} + A_{c2}$$

$$\boldsymbol{A_{ct} = \frac{2Ty}{3} + \frac{T^2 S_t}{200}}$$

$$\boldsymbol{A_{ct} = T\left(\frac{2y}{3}\right) + (\frac{S_t}{200})}$$

$$\boldsymbol{A_{ct} = \frac{4\sqrt{6} * y^{\frac{3}{2}}}{3} + \frac{S_t y}{75}}$$

Act = área de corte total m^2

Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal

$$V_{cT} = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)(m^2) * 1{,}0\frac{m}{m}$$

$$\mathbf{V_{cT}\left(\frac{m^3}{m}\right) = \frac{2Ty}{3} + \frac{T^2 * S_t}{200}}$$

$$\mathbf{V_{cT}\left(\frac{m^3}{m}\right) = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)}$$

$$\boldsymbol{V_{cT}\left(\frac{m^3}{m}\right) = \frac{4\sqrt{6} * y^{\frac{3}{2}}}{3} + \frac{S_t y}{75}}$$

Definición de **"y"** en términos de **"T"**:

$$T = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}$$

$$y = \left(\frac{T\sqrt{6}}{4}\right)^2$$

$$\boldsymbol{y = \frac{3T^2}{8}}$$

$$\boldsymbol{y = 0,375 * T^2}$$

Variables hidráulicas del perímetro mojado "P", radio hidráulico "R" y el tirante hidráulico "y":

0 < G ≤ 1:

Combinando las siguientes ecuaciones:

$$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$\boldsymbol{P = \frac{3T^2 + 8y^2}{3T}}$$

$$P = \frac{3T^2 + 8y^2}{3T}$$

$$P = \frac{3 * \left(\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}\right)^2 + 8y^2}{3 * \left(\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$P = \frac{3 * \frac{4 * 6}{9} * y + 8y^2}{3 * \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{8y + 8y^2}{3 * \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{8y + (1 + y)}{2\sqrt{6} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{8y}{2\sqrt{6}} * \frac{y}{y^{\frac{1}{2}}} * (1 + y)$$

$$\boldsymbol{P = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}(1 + y)}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{\frac{4\sqrt{6} * y^{\frac{3}{2}}}{3}}{\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}(1 + y)}$$

$$R = \frac{4\sqrt{6} * y^{\frac{3}{2}}}{3} * \frac{3}{2\sqrt{6} * y^{\frac{1}{2}}(1 + y)}$$

$$R = \frac{4y^{\frac{3}{2}}}{2y^{\frac{1}{2}}(1 + y)}$$

$$R = \frac{2y^{\frac{3}{2}}}{y^{\frac{1}{2}}(1 + y)}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{2y}{1 + y}}$$

Para el tirante:

$$\mathbf{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * \ S^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:
Q: caudal (m^3/s) máximo en la
acequia de ladera A: área (m^2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del
canal (m/m) n:
coeficiente de
rugosidad

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = A*R^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = A*\frac{A^{\frac{2}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{(\frac{4\sqrt{6}*y^{\frac{3}{2}}}{3})^{\frac{5}{3}}}{(\frac{2\sqrt{6}}{3}*y^{\frac{1}{2}}(1+y))^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{(\frac{4\sqrt{6}}{3})^{\frac{5}{3}}*y^{\frac{5}{2}}}{(\frac{2\sqrt{6}}{3})^{\frac{2}{3}}*y^{\frac{1}{3}}(1+y)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{4\sqrt{6}^{\frac{5}{3}}*3^{-\frac{5}{3}}*y^{\frac{5}{2}}}{2\sqrt{6}^{\frac{5}{3}}*3^{-\frac{2}{3}}*y^{\frac{1}{3}}(1+y)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{2^{\frac{8}{3}}*\sqrt{6}}{3}*\frac{y^{\frac{13}{6}}}{(1+y)^{\frac{2}{3}}}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$\frac{(1+y)^{\frac{2}{3}}}{y^{\frac{13}{6}}} = \frac{2^{\frac{8}{3}} * \sqrt{6} * S^{\frac{1}{2}}}{3Qn}$$

Se define “m” como una constante:

$$\mathrm{m} = \frac{2^{\frac{8}{3}} * \sqrt{6} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}{3 * \mathrm{Q} * \mathrm{n}}$$

Entonces:

$$\frac{(1+y)^{\frac{2}{3}}}{y^{\frac{13}{6}}} = m$$

$$\frac{(1+y)^{\frac{2}{3}}}{y^{\frac{13}{6}}} - m = 0$$

$$(1+y)^{\frac{2}{3}} - my^{\frac{13}{6}} = 0$$

$$\left((1+y)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(my^{\frac{13}{6}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$1+y = m^{\frac{3}{2}}y^{\frac{13}{6}}$$

$$-m^{\frac{3}{2}}y^{\frac{13}{6}} + 1 + y = 0$$

$$m^{\frac{3}{2}}y^{\frac{13}{6}} - 1 - y = 0$$

$$\left(\frac{2^{\frac{8}{3}} * 6^{\frac{1}{2}} * S^{\frac{1}{2}}}{3Qn}\right)^{\frac{3}{2}} y^{\frac{13}{6}} - 1 - y = 0$$

$$\left(\frac{2^{\frac{8}{3}*\frac{3}{2}} * (2*3)^{\frac{1}{2}*\frac{3}{2}} * S^{\frac{1}{2}*\frac{3}{2}}}{3^{\frac{3}{2}} * Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}}}\right) y^{\frac{13}{6}} - 1 - y = 0$$

$$\left(\frac{2^4 * 2^{\frac{3}{4}} * 3^{\frac{3}{4}} * S^{\frac{3}{4}}}{3^{*\frac{3}{2}} * Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}}}\right) y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\boldsymbol{\frac{2^{\frac{19}{4}} * S^{\frac{3}{4}}}{3^{\frac{3}{4}} * Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0}$$

Para resolver esta ecuación se puede realizar por el método del tanteo o por el método gráfico o cualquier otro método

Ejemplo de cálculo con los mismos datos

Q = 0,1 m^3/s

S = 0,003 m/m

n = 0,033

$$\frac{2^{\frac{19}{4}} * S^{\frac{3}{4}}}{3^{\frac{3}{4}} * Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{2^{\frac{19}{4}} * (0{,}003)^{\frac{3}{4}}}{3^{\frac{3}{4}} * (0{,}1)^{\frac{3}{2}} * (0{,}033)^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{2^{\frac{19}{4}} * (3x10^{-3})^{\frac{3}{4}}}{3^{\frac{3}{4}} * (10^{-1})^{\frac{3}{2}} * (33x10^{-3})^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{2^{\frac{19}{4}} * 3^{\frac{3}{4}} * 10^{\frac{-9}{4}}}{3^{\frac{3}{4}} * 10^{-\frac{3}{2}} * 33^{\frac{3}{2}} * 10^{\frac{-9}{4}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{2^{\frac{19}{4}} * 10^{\frac{-9}{4}}}{10^{-\frac{3}{2}} * 33^{\frac{3}{2}} * 10^{\frac{-9}{4}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{2^{\frac{19}{4}} * 10^{\frac{15}{4}}}{33^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{2^{\frac{19}{4}} * 2^{\frac{15}{4}} * 5^{\frac{15}{4}}}{33^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{2^{\frac{34}{4}} * 5^{\frac{15}{4}}}{33^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$\frac{151318{,}6574}{189{,}5706} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$798{,}2180 * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$$

$$798{,}2180 * y^{\frac{13}{6}} = y + 1$$

$$y^{\frac{13}{6}} = \frac{y+1}{798{,}2180}$$

$$y = \left(\frac{y+1}{798{,}2180}\right)^{\frac{13}{6}}$$

$$\boldsymbol{y = 0{,}04383\ m}$$

Comprobando el valor encontrado mediante el cálculo del caudal por medio del valor de “y”
Cálculo de “T” “Área”:

$$\mathrm{T} = \frac{2\sqrt{6}}{3} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}$$

$$\mathrm{T} = \frac{2\sqrt{6}}{3} * 0{,}04383^{\frac{1}{2}}$$

$$\mathrm{T} = 0{,}3419$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$\mathbf{Ac1} = \frac{\mathbf{4 * \sqrt{6}}}{\mathbf{9}} * \mathbf{y}^{\frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4 * \sqrt{6}}{9} * 0{,}04383^{\frac{3}{2}}$$

$$\mathbf{Ac1 = 0,0099896}$$

$$\boldsymbol{P = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}(1 + y)}$$

$$\mathrm{P} = \frac{2\sqrt{6}}{3} * 0{,}04383^{\frac{1}{2}}(1 + 0{,}04383)$$

$$\mathbf{P = 0,35686}$$

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}0099896}{0{,}35686}$$

$$\mathbf{R = \ 0,02799}$$

$$\mathrm{R}^{\frac{2}{3}} = \ 0{,}02799^{\frac{2}{3}}$$

$$\mathbf{R^{\frac{2}{3}} = \ 0,0922}$$

$$\mathrm{Q} = \frac{\mathrm{A} * \mathrm{R}^{\frac{2}{3}} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}{\mathrm{n}}$$

$$\mathrm{Q} = \frac{0{,}0099896 * 0{,}0922 * 0{,}003^{\frac{1}{2}}}{0{,}033}$$

$$\mathbf{Q = \ 0,0015\ \frac{m^3}{s}}$$

Probando la 2da opción

Estimación de **G**:

$$\boldsymbol{G = \frac{4y}{T}}$$

$$T = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}$$

$$G = \frac{4y}{\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$G = 4y * \frac{3}{2\sqrt{6} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$G = \frac{6 * y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{6}}$$

$$\mathrm{G} = \frac{6 * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{6}}$$

$$\mathrm{G} = \frac{6 * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{6}} * \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{6}}$$

$$\mathrm{G} = \frac{6\sqrt{6} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{6}$$

$$\boldsymbol{G = \sqrt{6} * y^{\frac{1}{2}}}$$

Para **G > 1**

Donde se debe de cumplir para este caso “a” que:

$$\sqrt{6} * y^{\frac{1}{2}} > 1$$

$$y^{\frac{1}{2}} > \frac{1}{\sqrt{6}}$$

$$(y^{\frac{1}{2}})^2 > (\frac{1}{\sqrt{6}})^2$$

$$\mathbf{y > \frac{1}{6}}$$

G > 1 siempre que se cumpla que $\boldsymbol{y >\ 0,1667}$

El **"y"** calculado debe de ser menor a $\mathbf{0,1667}$ m para poder usar el caso **0<G≤1**

Cálculo del perímetro mojado y combinando las siguientes ecuaciones:

$$\boldsymbol{P = \frac{T}{2}[(1 + G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G}Ln(G + (1 + G^2)^{\frac{1}{2}})]}$$
$$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$
$$\boldsymbol{G = \sqrt{6} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{\frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}{2} * [(1 + (\sqrt{6}\,y^{\frac{1}{2}})^{\ 2}\ )^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\left(\sqrt{6}\,y^{\frac{1}{2}}\right)} * Ln(\sqrt{6}\,y^{\frac{1}{2}} + (1$$
$$+ (\sqrt{6}\,y^{\frac{1}{2}})^{\ 2}\ )^{\frac{1}{2}})]$$

$$P = \frac{\sqrt{6}\,y^{\frac{1}{2}}}{3} * \left[1 + \sqrt{6y} + \frac{1}{\left(\sqrt{6}\,y^{\frac{1}{2}}\right)} * Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1 + 6y}\right)\right]$$

$$P = \frac{1}{3} * \sqrt{6y(1 + 6y)} + \frac{1}{3}Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1 + 6y}\right)$$

$$\boldsymbol{P = \frac{1}{3}\left[\sqrt{6y(1 + 6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1 + 6y}\right)\right]}$$

Cálculo del radio hidráulico

$$\boldsymbol{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{\frac{4*\sqrt{6}}{9}*y^{\frac{3}{2}}}{\frac{1}{3}\left[\sqrt{6y(1+6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1+6y}\right)\right]}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{4y\sqrt{6y}}{3\left[\sqrt{6y(1+6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1+6y}\right)\right]}}$$

Cálculo de **"y"**:

$$\boldsymbol{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:
Q: caudal (m^3/s) máximo en la acequia de ladera A: área (m^2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del canal (m/m) n: coeficiente de rugosidad

$$\frac{\mathrm{Q} * \mathrm{n}}{\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}} = \frac{\mathrm{A}^{\frac{5}{3}}}{\mathrm{P}^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{\left[\frac{4*\sqrt{6}}{9}*y^{\frac{3}{2}}\right]^{\frac{5}{3}}}{\left[\sqrt{6y(1+6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1+6y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{\left[\frac{4*\sqrt{6}}{9}*y^{\frac{3}{2}}\right]^{\frac{5}{3}}}{\left[\sqrt{6y(1+6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1+6y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$$

Ejemplo: Se toma el mismo ejemplo del caso parabólico 1 para dar la solución calculando "y"

Q = 0,1 m^2/s
S = 0,003
n = 0,033

$$\frac{\left[\frac{4*\sqrt{6}}{9}*y^{\frac{3}{2}}\right]^{\frac{5}{3}}}{\left[\sqrt{6y(1+6y)}+Ln\left(\sqrt{6y}+\sqrt{1+6y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=0$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{0,1*0,033}{\sqrt{0,003}}=0,060249$$

$$\frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}=\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}=0,060249$$

$$\frac{\left[\frac{4*\sqrt{6}}{9}*y^{\frac{3}{2}}\right]^{\frac{5}{3}}}{\left[\sqrt{6y(1+6y)}+Ln\left(\sqrt{6y}+\sqrt{1+6y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}}-0,060249=0$$

$$\boldsymbol{y=0,4651\quad m}$$

$$T=\frac{2\sqrt{6}}{3}*y^{\frac{1}{2}}$$

$$T=\frac{2\sqrt{6}}{3}*0,4651^{\frac{1}{2}}$$

$$\boldsymbol{T=1,1137}$$

$$Ac1=\frac{4*\sqrt{6}}{9}*y^{\frac{3}{2}}$$

$$Ac1=\frac{4*\sqrt{6}}{9}*0,4651^{\frac{3}{2}}$$

$$\boldsymbol{Ac1=0,3453}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$P = \sqrt{6 * 0{,}4651(1 + 6 * 0{,}4651)} + Ln\left(\sqrt{6 * 0{,}4651} + \sqrt{1 + 6 * 0{,}4651}\right)$$

$$\boldsymbol{P = 4,5382}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{0{,}3453}{4{,}5382}$$

$$\boldsymbol{R = 0,0761\ m}$$

Cálculo del caudal utilizando Manning para comprobar que los valores son correctos.

$$Q = \frac{1}{0{,}033} * 0{,}3453 \ * 0{,}0761^{\frac{2}{3}} * \ 0{,}003^{\frac{1}{2}}$$

$$\mathbf{Q = 0,1029\ \frac{m^3}{s}}$$

Redondeando

$$\boldsymbol{Q = 0,1\ \frac{m^3}{s}}$$

Se puede observar que en las dos metodologías se obtuvieron valores del tirante “y” menores a 0,5 m y también en las dos metodologías se obtuvieron caudales muy semejantes o casi iguales entre ellos juntamente con el caudal de diseñó.

Calculando el área de corte 2 “Ac2” con los valores encontrados de la metodología del caso “A” donde **0 < G ≤ 1** porque es ligeramente más exacta.

$\mathbf{y\ = 1,5 * x^2 = \frac{3x^2}{2}}$ **, donde se observa que** $\boldsymbol{a = 1,5 = \frac{3}{2}}$

y = 0,4651 m
$Ac1$ = 0,3453 m^2
T = 1,1137 m
P = 4,5382 m
R = 0,0761
S_t = 30

$$A_{c2} = \frac{T^2 S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{1{,}1137^2 * 30}{200}$$

$$A_{c2} = 0{,}1860\ m^2$$

Calculado el área de corte total utilizando la Ecuación1:

$$A_{cT} = A_{c1} + A_{c2}$$

$$A_{cT} = 0{,}3453 + 0{,}1860$$

$$\boldsymbol{A_{cT} = 0{,}5313\ m^2}$$

Donde
Act = área de corte total m^2
Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal se multiplica por 1,0 m de distancia

$$\boldsymbol{V_{cT} = 0{,}5313 \left(\frac{m^3}{m}\right)}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Cuadro 1: Resumen de las ecuaciones fundamentales hidráulicas de los Canales Parabólicos para una función definida como $f(x) = y = 1,5 * x^2$

Valor de "a"		1,5
$f = \frac{2}{\sqrt{a}}$		$f = \frac{2\sqrt{6}}{3}$
$T = f * \sqrt{y}$		$T = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}$
Área hidráulica o Ac1	$Ac1 = \frac{2T * y}{3}$	$Ac1 = \frac{4 * \sqrt{6}}{9} * y^{\frac{3}{2}}$
Valor de G	$G = \frac{4y}{T}$	$G = \sqrt{6}\,y^{\frac{1}{2}}$
Perímetro mojado condición 0<G≤1	$Pm = T + \frac{8y^2}{3T}$	$P = \frac{2\sqrt{6}}{3} * y^{\frac{1}{2}}(1 + y)$
Radio hidráulico condición 0<G≤1	$R = \frac{2 * T^2 * y}{3 * T^2 + 8 * y^2}$	$R = \frac{2y}{1 + y}$
Perímetro mojado: condición G > 1	$Pm = \frac{T}{2}\left[(1 + (\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} Ln(\frac{4y}{T} + (1 + ((\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}})\right]$	$P = \frac{1}{3}\left[\sqrt{6y(1+6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1+6y}\right)\right]$
Radio hidráulico para la condición G > 1	$R = \frac{\frac{2T * y}{3}}{\frac{T}{2}\left[(1 + (\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} Ln(\frac{4y}{T} + (1 + ((\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}})\right]}$	$R = \frac{4y\sqrt{6y}}{3\left[\sqrt{6y(1+6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1+6y}\right)\right]}$
Tirante "y" hidráulico condición 0<G≤1	$\frac{2^{\frac{19}{4}} * S^{\frac{3}{4}}}{3^{\frac{3}{4}} * Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}}} * y^{\frac{13}{6}} - y - 1 = 0$	
Tirante "y" hidráulico: condición G > 1	$\frac{\left[\frac{4 * \sqrt{6}}{9} * y^{\frac{3}{2}}\right]^{\frac{5}{3}}}{\left[\sqrt{6y(1+6y)} + Ln\left(\sqrt{6y} + \sqrt{1+6y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$	

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Ejemplo de cálculo de la rugosidad para un canal empastado con las condiciones antes vistas

Q=0,1 m³/s

n= 0,033

S=0,003 m/m

St=35 %

Ecuación de Manning

$$\mathrm{Q}=\frac{\mathrm{A}^{\frac{5}{3}} * \sqrt{\mathrm{S}}}{\mathrm{P}^{\frac{2}{3}} * \mathrm{n}}$$

$$\mathrm{Ac1}=\frac{2\mathrm{T} * \mathrm{y}}{3}$$

$$\mathbf{Ac1}=\frac{\mathbf{4} * \mathbf{y}^{\frac{3}{2}}}{\mathbf{3}}$$

Cálculo del perímetro para la condición de **G>1**

$$\mathrm{Pm}=\frac{\mathrm{T}}{2}\left[\left(1+\left(\frac{4\mathrm{y}}{\mathrm{T}}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}+\frac{\mathrm{T}}{4\mathrm{y}} \mathrm{Ln}\left(\frac{4\mathrm{y}}{\mathrm{T}}+\left(1+\left(\frac{4\mathrm{y}}{\mathrm{T}}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

$$\mathbf{Pm}=\mathbf{y}^{\frac{1}{2}} * (\mathbf{1}+\mathbf{4y})^{\frac{1}{2}}+\mathbf{0,5} * \mathbf{Ln}\left(\mathbf{2} * \mathbf{y}^{\frac{1}{2}}+(\mathbf{1}+\mathbf{4} * \mathbf{y})^{\frac{1}{2}}\right)$$

Cálculo de “y”

$$Q=\frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$0.1=\frac{\left(\frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3}\right)^{\frac{5}{3}} * \sqrt{0{,}003}}{\left(y^{\frac{1}{2}} * (1+4y)^{\frac{1}{2}}+0{,}5 * Ln\left(2 * y^{\frac{1}{2}}+(1+4 * y)^{\frac{1}{2}}\right)\right)^{\frac{2}{3}} * 0{,}033}$$

y =**0,4651 m**

Cálculo el área de corte

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4 * \mathrm{y}^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4 * 0{,}4651^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,4229\ m^2}$$

Velocidad

$$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{A}}$$

$$\mathrm{V} = \frac{0{,}1}{0{,}4229}$$

$$\mathbf{V = 0,2364 \frac{m}{s}}$$

Cálculo del perímetro mojado.

$$Pm = y^{\frac{1}{2}} * (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 0{,}5 * Ln(2 * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * y)^{\frac{1}{2}})$$

$$Pm = 0{,}4651^{\frac{1}{2}} * (1 + 4 * 0{,}4651)^{\frac{1}{2}} + 0{,}5 * Ln(2 * 0{,}4651^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * 0{,}4651)^{\frac{1}{2}})$$

$$\mathbf{Pm = 1,7120\ \ m}$$

Radio hidráulico

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}4229\ \mathrm{m}^2}{1{,}7120\ \mathrm{m}}$$

$$\boldsymbol{R = 0,2470\ m}$$

Cálculo del flujo

$$V * R = Velocidad * Radio$$

$$V * R = 0{,}2364\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}2470\,m$$

$$\boldsymbol{\ddot{V} * R = 0,0584\;s}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

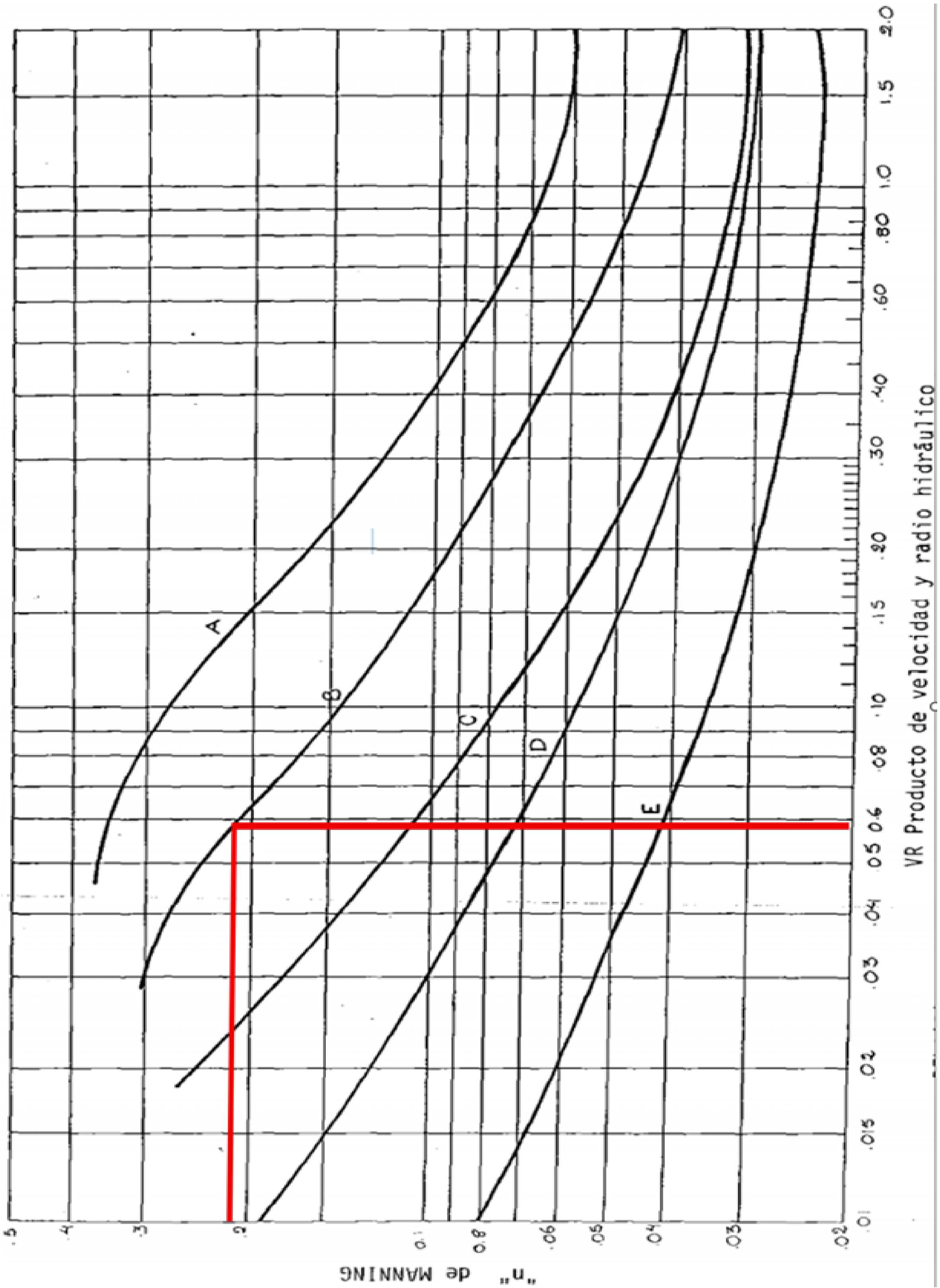

Figura 6: Coeficiente de rugosidad para la primera iteración dando valor **n=0,22**

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$0.1 \ = \frac{(\frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3})^{\frac{5}{3}} * \sqrt{0{,}003}}{(y^{\frac{1}{2}} * (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 0{,}5 * Ln\left(2 * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * y)^{\frac{1}{2}}\right))^{\frac{2}{3}} * 0{,}22}$$

$\boldsymbol{y}$ =**0,7140 m**

Cálculo del área de corte

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4 * \mathrm{y}^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4 * 0{,}7140^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,8044\ m^2}$$

Velocidad

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{A}}$$

$$\mathrm{V} = \frac{0{,}1}{0{,}8044}$$

$$\mathrm{V} = 0{,}1243\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

Cálculo del perímetro mojado

$$Pm = y^{\frac{1}{2}} * (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 0{,}5 * Ln(2 * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * y)^{\frac{1}{2}})$$

$$Pm = 0{,}7140^{\frac{1}{2}} * (1 + 4 * 0{,}7140)^{\frac{1}{2}} + 0{,}5 * Ln(2 * 0{,}7140^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * 0{,}7140)^{\frac{1}{2}})$$

$$\boldsymbol{Pm = 2,3070\ \ m}$$

Radio hidráulico

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}8044\ \mathrm{m}^2}{2{,}3070\ \mathrm{m}}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{0{,}3487\ m}$$

Cálculo del flujo

$$V * R = \ Velocidad * \ Radio$$

$$V * R\ = 0{,}1243\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}3487\ m$$

$$\boldsymbol{V} * \boldsymbol{R} = \mathbf{0{,}0433\ s} \approx \mathbf{0{,}04\ s}$$

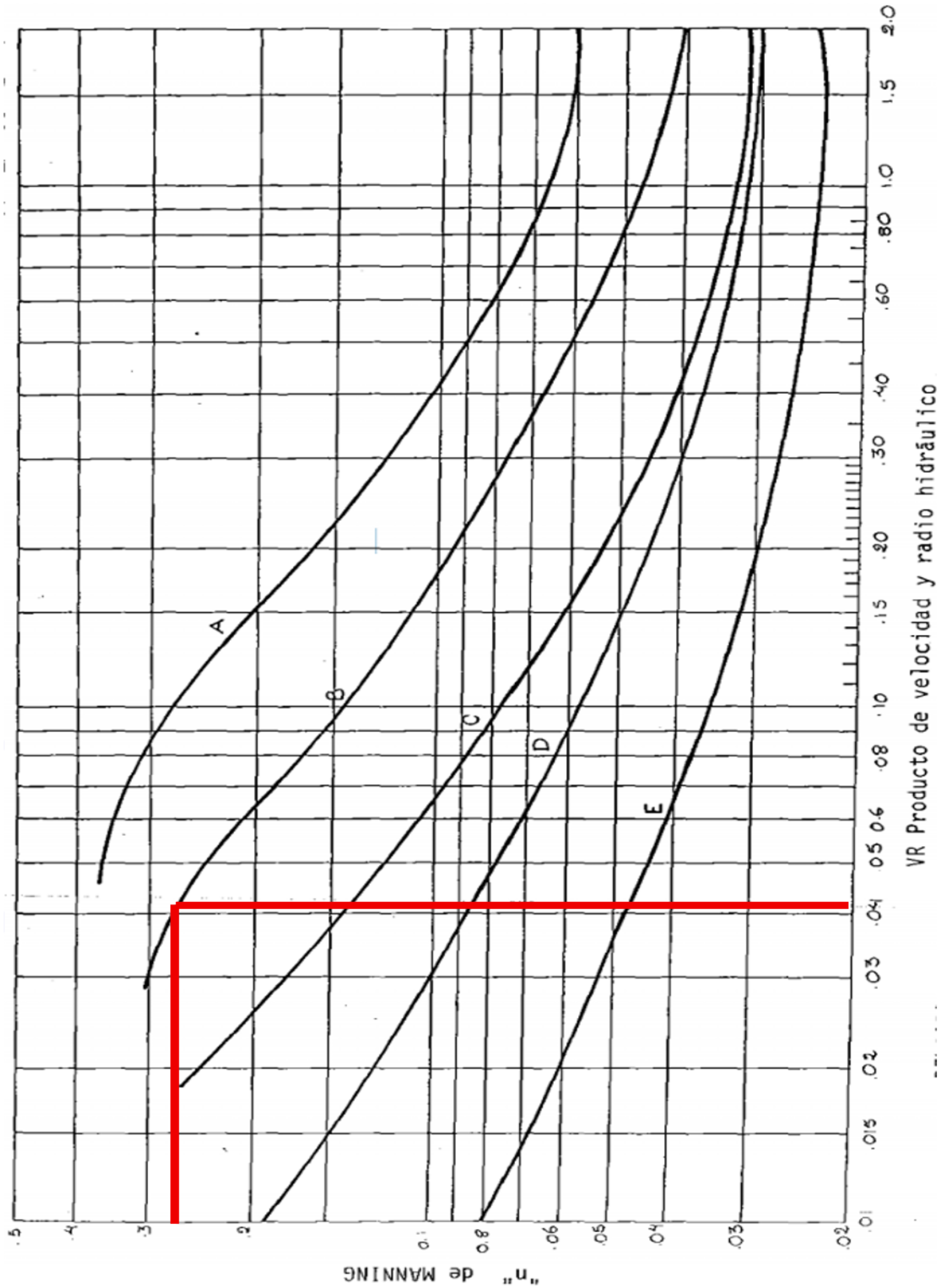

Figura 7: Coeficiente de rugosidad para la segunda iteración dando valor **n=0,27**

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$0.1 \ = \frac{(\frac{4 * y^{\frac{3}{2}}}{3})^{\frac{5}{3}} * \sqrt{0,003}}{(y^{\frac{1}{2}} * (1 + 4y)^{\frac{1}{2}} + 0,5 * Ln\left(2 * y^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * y)^{\frac{1}{2}}\right))^{\frac{2}{3}} * 0,27}$$

$\boldsymbol{y}$ =**0,7950 m**

Cálculo del área de corte

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4 * \mathrm{y}^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4 * 0{,}7950^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$\mathbf{Ac1 = 0,9451 \ \ m^2}$$

Velocidad

$$\mathbf{V = \frac{Q}{A}}$$

$$\mathrm{V} = \frac{0{,}1}{0{,}9451}$$

$$\mathbf{V = 0,1058 \frac{m}{s}}$$

Cálculo del perímetro mojado

$$\mathrm{Pm} = \mathrm{y}^{\frac{1}{2}} * (1 + 4\mathrm{y})^{\frac{1}{2}} + 0{,}5 * \mathrm{Ln}(2 * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * \mathrm{y})^{\frac{1}{2}})$$

$$\mathrm{Pm} = 0{,}7950^{\frac{1}{2}} * (1 + 4 * 0{,}7950)^{\frac{1}{2}} + 0{,}5 * \mathrm{Ln}(2 * 0{,}7950^{\frac{1}{2}} + (1 + 4 * 0{,}7950)^{\frac{1}{2}})$$

$$\mathbf{Pm = 2,4940 \ \ m}$$

Radio hidráulico

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}9451\ \mathrm{m}^2}{2{,}4940\ \mathrm{m}}$$

$$\mathbf{R = 0,3789\ m}$$

Cálculo del flujo

$$V * R = \ Velocidad * \ Radio$$

$$V * R = 0{,}1058\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}3789\ m$$

$$\boldsymbol{V * R = 0,0401\ \mathbf{s} \approx 0,04\ \mathbf{s}}$$

Diseño de canal parabólico con a = 2,5 = $\frac{5}{2}$

La función matemática que representa el canal es $y = \frac{5}{2} * x^2$ y el canal se representa en la figura 8.

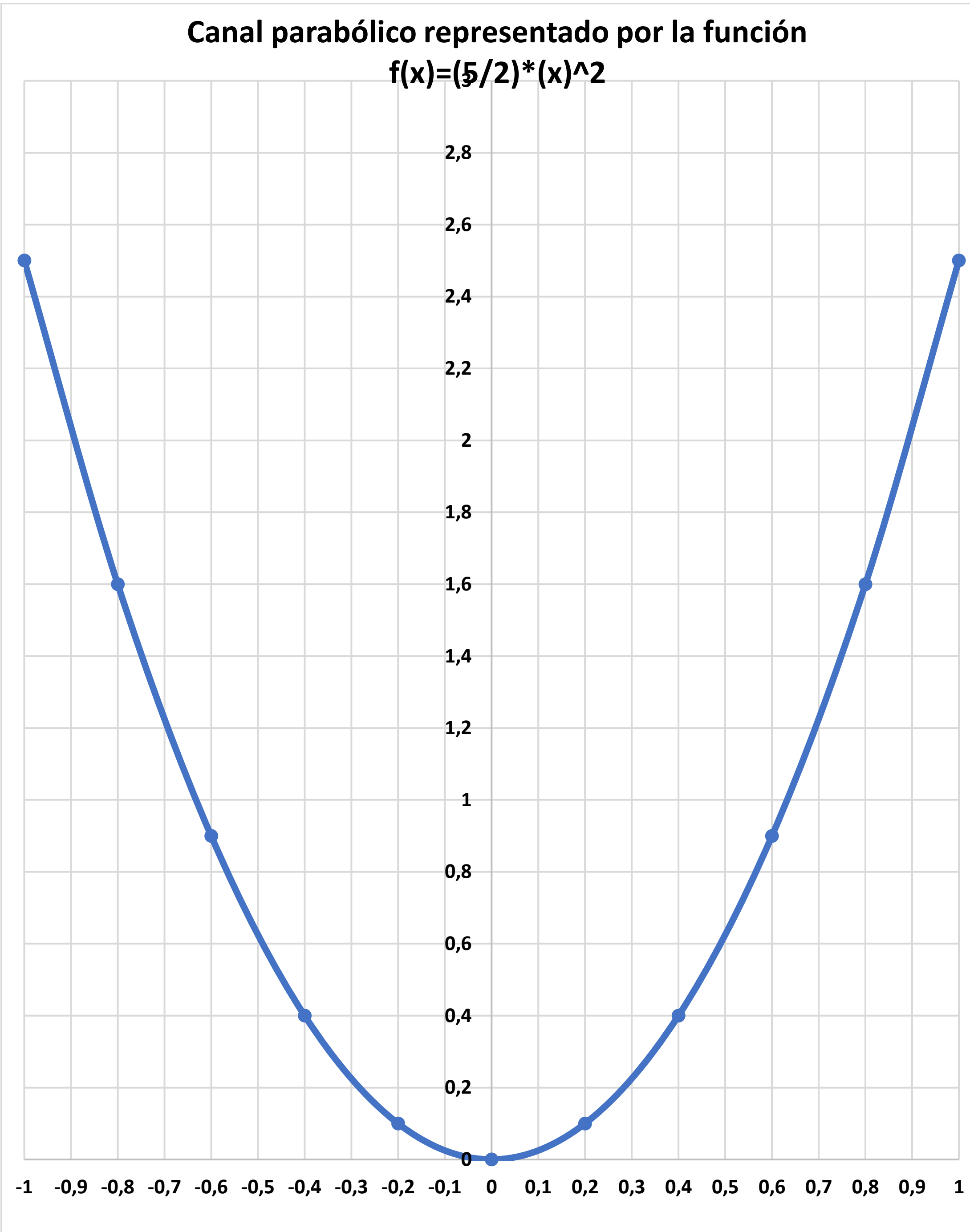

Figura 8: Canal parabólico para la ecuación: $\boldsymbol{y = \frac{5}{2} * x^2}$

Calculando "f" para establecer las ecuaciones en una sola variable

$$f = \frac{2}{\sqrt{a}}$$

$$f = \frac{2}{\sqrt{\frac{5}{2}}}$$

$$f = \frac{2}{\sqrt{\frac{5}{2}}}$$

$$f = \frac{2}{\frac{\sqrt{5}}{\sqrt{2}}}$$

$$f = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{5}}$$

$$\boldsymbol{f = \frac{2\sqrt{10}}{5}}$$

Lo cual nos indica que la relación matemática entre **"T"** y **"y"** queda definida de la siguiente manera:

$$T = f * \sqrt{y}$$

$$T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * \sqrt{y}$$

$$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}}$$

Para el cálculo de las áreas y volúmenes de corte primeramente se expresará en términos del espejo de agua **"T"** y el tirante **"y"** para establecer las ecuaciones según la función matemática específica que representa el canal conductor de la acequia de ladera expresando en una sola variable.

Las ecuaciones de las variables hidráulicas de área de corte 1 (Ac1), área de corte 2 (Ac2), perímetro mojado (Pm o P) y radio hidráulico (R o Rh) en función de solamente la variable “y”

El cálculo del área hidráulica que es la misma que el área de corte 1 “Ac1” que esta está dada por la Ecuación 5.

$$\mathrm{Ac1} = \frac{2\mathrm{T} * \mathrm{y}}{3}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{2 * (\frac{2\sqrt{10}}{5} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}) * \mathrm{y}}{3}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{\frac{4\sqrt{10}}{5} * \mathrm{y}^{\frac{3}{2}}}{3}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4\sqrt{10} * \sqrt{\mathrm{y}^3}}{15}$$

$$\mathbf{Ac1} = \frac{\mathbf{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}}{\mathbf{15}}$$

Cálculo del área de corte 2 “Ac2” combinando las siguientes ecuaciones:

$$\boldsymbol{Ac2 = \frac{T^2 * S_t}{200}}$$

$$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$Ac2 = \frac{(\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}})^2 * S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{(\frac{2\sqrt{10}}{5})^2 * (y^{\frac{1}{2}})^2 * S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{\frac{(2\sqrt{10})^2}{(5)^2} * (y^{\frac{1}{2}})^2 * S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{\frac{4 * 10}{25} * y * S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{\frac{4 * 2}{5} * y * S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{\frac{8}{5} * y * S_t}{200}$$

$$\boldsymbol{Ac2 = \frac{y * S_t}{125}}$$

Calculando el área de corte total

$$Ac_t = AC_1 + AC_2$$

$$Ac_t = \frac{2T * y}{3} + \frac{T^2 * S_t}{200}$$

$$Ac_t = T(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200})$$

$$Ac_t = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}} * (\frac{2y}{3} + \frac{\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}} * S_t}{200})$$

$$Ac_t = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}} * \left(\frac{2y}{3} + \frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}} * S_t}{500}\right)$$

$$Ac_t = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}} * \frac{2y}{3} + \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}} * \frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}} * S_t}{500}$$

$$Ac_t = \frac{4\sqrt{10}y^{3/2}}{15} + \frac{2 * 10y * St}{2500}$$

$$\mathbf{Ac_t = \frac{4 * \sqrt{10} * y^{3/2}}{15} + \frac{y * St}{125}}$$

$$\mathbf{Ac_t = \frac{y}{5} * (\frac{4 * \sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{3} + \frac{St}{25})}$$

Act = área de corte total (m^2) Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal

$$Vc_t = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)(m^2) * 1\frac{m}{m}$$

$$Vc_t(\frac{m^3}{m}) = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)$$

$$Vc_t(\frac{m^3}{m}) = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}} * \frac{2y}{3} + \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}} * \frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}} * S_t}{500}$$

$$Vc_t(\frac{m^3}{m}) = \frac{4\sqrt{10} * y^{3/2}}{15} + \frac{2 * 10 * y * St}{2500}$$

$$\boldsymbol{Vc_t(\frac{m^3}{m}) = \frac{4 * \sqrt{10} * y^{3/2}}{15} + \frac{y * St}{125}}$$

$$\boldsymbol{Vc_t(\frac{m^3}{m}) = \frac{y}{5} * (\frac{4 * \sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{3} + \frac{St}{25})}$$

Definición de “y” en términos de “T”:

$$T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}$$

$$5T = 2\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}$$

$$y^{\frac{1}{2}} = \frac{5T}{2\sqrt{10}}$$

$$y = \left(\frac{5T}{2\sqrt{10}}\right)^2$$

$$\boldsymbol{y = \frac{25T^2}{40}}$$

$$\boldsymbol{y = \frac{5T^2}{8}}$$

Variables hidráulicas del perímetro mojado "P", radio hidráulico "R" y el tirante hidráulico "y"

0 < G ≤ 1

$$P = \frac{3T^2 + 8y^2}{3T}$$

$$T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}$$

$$P = \frac{3(\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}})^2 + 8y^2}{3(\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}})}$$

$$P = \frac{3 * (\frac{2^2 * \sqrt{10}^2}{5^2} * y^{\frac{1}{2}^2}) + 8y^2}{3\left(\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$P = \frac{3 * (\frac{4 * 10}{25} * y) + 8y^2}{3\left(\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$P = \frac{3 * (\frac{40}{25} * y) + 8y^2}{3\left(\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$P = \frac{3 * (\frac{8}{5}y) + 8y^2}{3\left(\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$P = \frac{\frac{24}{5}y + 8y^2}{\frac{6\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{24y + 40y^2}{6\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{12y + 20y^2}{3\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{4y(3 + 5y)}{3\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{4(3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}{3\sqrt{10}} * \sqrt{10}$$

$$\mathbf{P = \frac{4 * \sqrt{10} * (3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}{3}}$$

Cálculo del radio hidráulico:

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{\frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15}}{\frac{4 * \sqrt{10} * (3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}{3}}$$

$$R = \frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y} * 3}{15 * 4 * \sqrt{10} * (3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$R = \frac{y\sqrt{y} * 3}{15 * (3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$R = \frac{3 * y}{15 * (3 + 5y)}$$

$$R = \frac{(y)}{5(3 + 5y)}$$

$$\mathbf{R = \frac{(y)}{15 + 25y}}$$

Para el tirante:

$$\mathbf{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

Donde: Q: caudal (m3 /s) máximo en la acequia de ladera
A: área (m2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del canal (m/m)
n: coeficiente de rugosidad

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = A * R^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = A * \frac{A^{\frac{2}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{\left(\frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left(\frac{4 * \sqrt{10} * (3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}{3}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{4 * \sqrt{10} * y^{13/6}}{3 * 5^{\frac{5}{3}} * (3 + 5y)^{2/3}}$$

$$\frac{4 * \sqrt{10} * Q * n}{3 * 5^{\frac{5}{3}} * S^{\frac{1}{2}}} = \frac{y^{13/6}}{(3 + 5y)^{2/3}}$$

$$m = \frac{4 * \sqrt{10} * Q * n}{3 * 5^{\frac{5}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

Entonces

$$m = \frac{y^{13/6}}{(3 + 5y)^{2/3}}$$

$$y^{13/6} = m * (3 + 5y)^{2/3}$$

$$\left(y^{\frac{13}{6}}\right)^{\frac{3}{2}} = m^{\frac{3}{2}} * ((3 + 5y)^{2/3})^{\frac{3}{2}}$$

$$y^{\frac{13}{4}} = m^{\frac{3}{2}} * (3 + 5y)$$

$$y^{\frac{13}{4}} = 3m^{\frac{3}{2}} + 5m^{\frac{3}{2}}y$$

$$\boldsymbol{y^{\frac{13}{4}} - 3m^{\frac{3}{2}} - 5m^{\frac{3}{2}}y = 0}$$

Combinando las ecuaciones:

$$m = \frac{4 * \sqrt{10} * Q * n}{3 * 5^{\frac{5}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\boldsymbol{y^{\frac{13}{4}} - 3m^{\frac{3}{2}} - 5m^{\frac{3}{2}}y = 0}$$

$$\mathrm{y}^{\frac{13}{4}} - 3 * \left(\frac{4 * \sqrt{10} * \mathrm{Q} * \mathrm{n}}{3 * 5^{\frac{5}{3}} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{3}{2}} - 5 * \left(\frac{4 * \sqrt{10} * \mathrm{Q} * \mathrm{n}}{3 * 5^{\frac{5}{3}} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{3}{2}} * \mathrm{y} = 0$$

$$\mathrm{y}^{\frac{13}{4}} - 3 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * \mathrm{Q}^{\frac{3}{2}} * \mathrm{n}^{\frac{3}{2}}}{3^{\frac{3}{2}} * 5^{\frac{5}{3} * \frac{3}{2}} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2} * \frac{3}{2}}} - 5 * \left(\frac{4 * \sqrt{10} * \mathrm{Q} * \mathrm{n}}{3 * 5^{\frac{5}{3}} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{3}{2}} * \mathrm{y} = 0$$

$$\mathrm{y}^{\frac{13}{4}} - 3 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * \mathrm{Q}^{3/2} * \mathrm{n}^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{3} * 3/2} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2} * 3/2}} - 5 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * \mathrm{Q}^{3/2} * \mathrm{n}^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{3} * 3/2} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2} * 3/2}} * \mathrm{y} = 0$$

$$\mathbf{y^{\frac{13}{4}} - 3 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * Q^{3/2} * n^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * S^{\frac{3}{4}}} - 5 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * Q^{3/2} * n^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * S^{\frac{3}{4}}} * y = 0}$$

Para resolver esta ecuación se puede realizar por el método del tanteo o por el método gráfico o cualquier otro método

Ejemplo de cálculo
Q = 0,1 m3 /s
S = 0,003 m/m
n = 0,033

$$\mathbf{y^{\frac{13}{4}} - 5 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * Q^{3/2} * n^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * S^{\frac{3}{4}}} * y - 3 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * Q^{3/2} * n^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * S^{\frac{3}{4}}} = 0}$$

$$y^{\frac{13}{4}} - 3 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * 0{,}1^{3/2} * 0{,}033^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * 0{,}003^{\frac{3}{4}}} - 5 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10}^{\frac{3}{2}} * 0{,}1^{3/2} * 0{,}033^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * 0{,}003^{\frac{3}{4}}} * y = 0$$

Resolviendo la ecuación:

$$\boldsymbol{y = 0,23953\ m}$$

Sustituyendo el valor de “y” para encontrar “T”:

$$T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}$$

$$T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * 0{,}23953^{\frac{1}{2}}$$

$$\mathbf{T = 0,619070\ m}$$

Calculando el área de corte 1 que coincide con el área hidráulica

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * \boldsymbol{y} * \sqrt{\boldsymbol{y}}}{15}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * 0{,}23953 * \sqrt{0{,}23953}}{15}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,098857\ m^2}$$

Cálculo del perímetro mojado

$$P = \frac{4 * \sqrt{10} * (3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}{3}$$

$$P = \frac{4 * \sqrt{10} * (3 + 5 * 0{,}23953) * 0{,}23953^{\frac{1}{2}}}{3}$$

$$\boldsymbol{P = 8{,}66213\ \mathrm{m}}$$

Cálculo del radio hidráulico de la sección transversal de conducción de agua en su máxima capacidad.

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{0{,}098857\ \ m^2}{8{,}66213\ \mathrm{m}}$$

$$\boldsymbol{R = 0,011412\ m}$$

Calculando el caudal con Manning

$$\mathbf{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

Donde: Q: caudal (m3 /s) máximo en la acequia de ladera
A: área (m2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del canal (m/m)
n: coeficiente de rugosidad Calculando $R^{\frac{2}{3}}$

$$R^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{A}{Pm}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$R^{\frac{2}{3}} = (0{,}011412\ )^{\frac{2}{3}}$$

$$\boldsymbol{R^{\frac{2}{3}} = 0,050688}$$

Cálculo del caudal

$$Q = \frac{A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

$$Q = \frac{0{,}098857 * 0{,}050688 * 0{,}003^{\frac{1}{2}}}{0{,}033}$$

$$\boldsymbol{Q = 0{,}00831686 \frac{m3}{s}}$$

Se observa que el caudal calculado es m al caudal definido en el ejemplo lo cual se debe de revisar el valor de “G” para la función matemática definida para el canal conductor de la acequia de ladera parabólica.

Estimación de **G**:

$$G = \frac{4y}{T}$$

$$G = \frac{4y}{\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$G = \frac{4y^{\frac{1}{2}}}{\frac{2\sqrt{10}}{5}}$$

$$G = \frac{5 * 4y^{\frac{1}{2}}}{2\sqrt{10}}$$

$$G = \frac{20y^{\frac{1}{2}}}{2\sqrt{10}}$$

$$G = \frac{10y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{10}}$$

$$G = \frac{10y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{10}} * \frac{\sqrt{10}}{\sqrt{10}}$$

$$G = \frac{10 * \sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{10} * \sqrt{10}}$$

$$G = \frac{10 * \sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{10}$$

$$\mathbf{G = \sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$\mathbf{G = \sqrt{10 * y}}$$

Para condición **G > 1**:

Se debe de cumplir para este caso “a” que:

$$G > 1$$

$$\sqrt{10y} > 1$$

$$(\sqrt{10y})^2 > (1)^{\mathbf{2}}$$

$$10y > 1$$

$$y > \frac{1}{10}$$

$$\boldsymbol{y > 0,1m}$$

El “y” calculado debe de ser mayor a 0,10 m para poder usar el caso **G>1** y para nuestro caso el “y” calculado bajo esta condición es mayor ya que el valor es de $\mathbf{0,239}$ m

Combinando las siguientes ecuaciones:

Donde:

$$T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * \boldsymbol{y}^{\frac{1}{2}}$$

$$\boldsymbol{G = \sqrt{10y}}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$\boldsymbol{P = \frac{T}{2}\left[(1+G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G}Ln(G + (1+G^2)^{\frac{1}{2}})\right]}$$

$$P = \frac{\frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}}{2} * \left[(1+\sqrt{10y}^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\sqrt{10y}}Ln(\sqrt{10y} + (1+\sqrt{10y}^2)^{\frac{1}{2}})\right]$$

$$P = \frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{5} * \left[(1+\sqrt{10y}^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\sqrt{10y}}Ln(\sqrt{10y} + (1+\sqrt{10y}^2)^{\frac{1}{2}})\right]$$

$$\mathbf{P} = \frac{\sqrt{\mathbf{10}} * \mathbf{y}^{\frac{1}{2}}}{\mathbf{5}}\left[(\sqrt{\mathbf{1+10y}}) + \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{10y}}}\mathbf{Ln}(\sqrt{\mathbf{10y}} + (\sqrt{\mathbf{1+10y}}))\right]$$

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{P}}$$

$$\mathbf{R} = \frac{\frac{4\sqrt{\mathbf{10}} * \mathbf{y}\sqrt{\mathbf{y}}}{\mathbf{15}}}{\frac{\sqrt{\mathbf{10}} * \mathbf{y}^{\frac{1}{2}}}{\mathbf{5}}\left[(\sqrt{\mathbf{1+10y}}) + \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{10y}}}\mathbf{Ln}(\sqrt{\mathbf{10y}} + (\sqrt{\mathbf{1+10y}}))\right]}$$

Cálculo de “y”:

$$\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{n}} * \mathbf{A} * \mathbf{R}^{\frac{2}{3}} * \mathbf{S}^{\frac{1}{2}}$$

Donde:
Q: caudal (m3 /s) máximo en la acequia de ladera
A: área (m2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del canal (m/m)
n: coeficiente de rugosidad

$$\frac{\mathrm{A}^{\frac{5}{3}}}{\mathrm{P}^{\frac{2}{3}}} = \frac{\mathrm{Q} * \mathrm{n}}{\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\mathrm{Q} * \mathrm{n}}{\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}} = \frac{0{,}1 * 0{,}033}{0{,}003^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\mathrm{Q}*\mathrm{n}}{\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}=0{,}060249$$

$$\frac{\left(\frac{4\sqrt{10}*\mathrm{y}\sqrt{\mathrm{y}}}{15}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left[\frac{\sqrt{10}*\mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{5}\left[\left(\sqrt{1+10\mathrm{y}}\right)+\frac{1}{\sqrt{10\mathrm{y}}}\mathrm{Ln}\left(\sqrt{10\mathrm{y}}+\left(\sqrt{1+10\mathrm{y}}\right)\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}=\frac{\mathrm{Q}*\mathrm{n}}{\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\frac{\left(4\sqrt{10}\right)^{5/3}*\left(\mathrm{y}^{\frac{3}{2}}\right)^{5/3}}{(15)^{5/3}}}{\left[\frac{\sqrt{10}*\mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1+10\mathrm{y}})+\frac{1}{\sqrt{10\mathrm{y}}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10\mathrm{y}}+(\sqrt{1+10\mathrm{y}}))\right]\right]^{\frac{2}{3}}}=\frac{\mathrm{Q}*\mathrm{n}}{\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\frac{\left(4\sqrt{10}\right)^{\frac{5}{3}}*\left(\mathrm{y}^{\frac{5}{2}}\right)}{(15)^{\frac{5}{3}}}}{\frac{\sqrt{10^{\frac{2}{3}}}*\mathrm{y}^{\frac{1}{2}^{2/3}}}{5^{\frac{2}{3}}}\left[\left(\sqrt{1+10\mathrm{y}}\right)+\frac{1}{\sqrt{10\mathrm{y}}}\mathrm{Ln}\left(\sqrt{10\mathrm{y}}+\sqrt{1+10\mathrm{y}}\right)\right]^{\frac{2}{3}}}=\frac{\mathrm{Q}*\mathrm{n}}{\mathrm{S}^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\left(4\sqrt{10}\right)^{\frac{5}{3}}*\left(y^{\frac{5}{2}}\right)*5^{\frac{2}{3}}}{\frac{\sqrt{10^{\frac{2}{3}}}*\boldsymbol{y}^{\frac{1}{3}}}{5^{\frac{2}{3}}}*\left[\left(\sqrt{1+10y}\right)+\frac{1}{\sqrt{10y}}Ln\left(\sqrt{10y}+\sqrt{1+10y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}}=\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{4^{\frac{5}{3}}*5^{\frac{4}{3}}*\sqrt{10}*y^{\frac{13}{6}}}{\left[\left(\sqrt{1+10y}\right)+\frac{1}{\sqrt{10y}}Ln\left(\sqrt{10y}+\sqrt{1+10y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}}=\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\boldsymbol{\frac{4^{\frac{5}{3}}*5^{\frac{4}{3}}*\sqrt{10}*y^{\frac{13}{6}}}{\left[\left(\sqrt{1+10y}\right)+\frac{1}{\sqrt{10y}}Ln\left(\sqrt{10y}+\sqrt{1+10y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=0}$$

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$\frac{4^{\frac{5}{3}} * \sqrt{10} * y^{\frac{13}{6}}}{5 * 3^{\frac{3}{5}} * \left[\left(\sqrt{1+10y}\right) + \frac{1}{\sqrt{10y}}\mathrm{Ln}\left(\sqrt{10y} + \sqrt{1+10y}\right)\right]^{\frac{2}{3}}} - 0{,}060249 = 0$$

$$\boldsymbol{y = 0,376250m}$$

se cumple que y > **0**,10m

Cálculo de T

$$\mathrm{T} = \frac{2\sqrt{10}}{5} * \sqrt{0{,}376250}$$

$$\mathrm{T} = \frac{2\sqrt{10}}{5} * \sqrt{0{,}376250}$$

$$\boldsymbol{T = 0,775887\ m}$$

Cálculo del área hidráulica que es el área de corte 1

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * y * \sqrt{y}}{15}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4\sqrt{10} * 0{,}376250 * \sqrt{0{,}376250}}{15}$$

$$Ac1 = 0{,}194618\, m^2$$

Cálculo del perímetro mojado

$$\mathrm{P} = \frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1+10y}) + \frac{1}{\sqrt{10y}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10y} + (\sqrt{1+10y}))\right]$$

$$\mathrm{P} = \frac{\sqrt{10} * 0{,}376250^{\frac{1}{2}}}{5}\left[\left(\sqrt{1+10*0{,}376250}\right) + \frac{1}{\sqrt{10*0{,}376250}} * (\mathrm{Ln}(\sqrt{10*0{,}376250} + \left(\sqrt{1+10*0{,}376250}\right)))\right]$$

$$\boldsymbol{P = 1,129884m}$$

Cálculo del radio hidráulico

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0,194618}{1,129884}$$

$$\boldsymbol{R = 0,172246\ m}$$

Cálculo del caudal utilizando Manning para comprobar que los valores son correctos

$$\mathbf{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\mathrm{R}^{\frac{2}{3}} = (0,004122)^{\frac{2}{3}} = 0,309575$$

$$Q = \frac{1}{0,033} * 0,194618 * 0,309575 * 0,003^{\frac{1}{2}}$$

$$\boldsymbol{Q = 0,099998\frac{m^3}{s}}$$

Redondeando el valor del caudal calculado

$$\boldsymbol{Q = 0,1\frac{m^3}{s}}$$

Donde se logra comprobar que el caudal calculado es prácticamente igual al caudal propuesto para el ejemplo por lo que es correcto utilizar la segunda opción o caso “b” para los cálculos respectivos.

$\mathbf{y = \frac{5}{2} * x^2}$ **De donde se observa que $\boldsymbol{a}$ = 2,5**

Calculando el área de corte 2 “Ac2”
y= $0,446518m$
St= 30

$$Ac2 = \frac{T^2 * S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{y * S_t}{125}$$

$$\mathrm{Ac2} = \frac{0{,}376250 * 30}{125}$$

$$\boldsymbol{Ac2 = 0,0903\ m^2}$$

Calculando el volumen de corte por metro para este caso

$$Vc_t(\frac{m^3}{m}) = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)$$

$$Vc_t\left(\frac{m^3}{m}\right) = \frac{2\sqrt{10}}{5} * \sqrt{y} * \left(\frac{2y}{3} + \frac{\frac{2\sqrt{10}}{5} * \sqrt{y}\ * S_t}{200}\right)$$

$$Vc_t\left(\frac{m^3}{m}\right) = \frac{2\sqrt{10}}{5} * \sqrt{0{,}376250} * \left(\frac{2y}{3} + \frac{\frac{2\sqrt{10}}{5} * \sqrt{0{,}376250}\ * 30}{200}\right)$$

$$\mathbf{Vc_t\left(\frac{m^3}{m}\right) = 0,420368}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Cuadro 2: Resumen de las ecuaciones fundamentales para las variables hidráulicas de los canales parabólico para una función definida como $y = \frac{5}{2} * x^2$

Valor de "a"		$a = 2,5 = \frac{5}{2}$
$f = \frac{2}{\sqrt{a}}$		$f = \frac{2\sqrt{10}}{5}$
$T = f * \sqrt{y}$		$T = \frac{2\sqrt{10}}{5} * y^{\frac{1}{2}}$
Área hidráulica o Ac1	$Ac1 = \frac{2T * y}{3}$	$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15}$
Valor de G	$G = \frac{4y}{T}$	$G = \sqrt{10 * y}$
Perímetro mojado condición 0<G≤1	$Pm = T + \frac{8y^2}{3T}$	$P = \frac{4 * \sqrt{10} * (3 + 5y) * y^{\frac{1}{2}}}{3}$
Radio hidráulico condición 0<G≤1	$R = \frac{2 * T^2 * y}{3 * T^2 + 8 * y^2}$	$R = \frac{(y)}{15 + 25y}$
Perímetro mojado: condición G > 1	$Pm = \frac{T}{2}\left[(1 + (\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} Ln(\frac{4y}{T} + (1 + ((\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}})\right]$	$P = \frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10y}) + \frac{1}{\sqrt{10y}} Ln(\sqrt{10y} + (\sqrt{1 + 10y}))\right]$
Radio hidráulico para la condición G > 1	$R = \frac{\frac{2T * y}{3}}{\frac{T}{2}\left[(1 + (\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} Ln(\frac{4y}{T} + (1 + ((\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}})\right]}$	$R = \frac{\frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15}}{\frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10y}) + \frac{1}{\sqrt{10y}} Ln(\sqrt{10y} + (\sqrt{1 + 10y}))\right]}$
Tirante hidráulico "y" condición 0<G≤1	$y^{\frac{13}{4}} - 3 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10^2}^{\frac{3}{2}} * Q^{3/2} * n^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * S^{\frac{3}{4}}} - 5 * \frac{4^{\frac{3}{2}} * \sqrt{10^2}^{\frac{3}{2}} * Q^{3/2} * n^{3/2}}{3^{3/2} * 5^{\frac{5}{2}} * S^{\frac{3}{4}}} * y = 0$	
Tirante hidráulico "y" condición G > 1	$\frac{4^{\frac{5}{3}} * 5^{\frac{4}{3}} * \sqrt{10} * y^{\frac{13}{6}}}{\left[(\sqrt{1 + 10y}) + \frac{1}{\sqrt{10y}} Ln(\sqrt{10y} + \sqrt{1 + 10y})\right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$	

Ejemplo de cálculo de la rugosidad para un canal empastado con las condiciones antes vistas

Q=0,1 m3/s

n= 0,033

S=0,003 m/m

De la ecuación de Manning

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$Ac1 = \frac{2T * y}{3}$$

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4\sqrt{10} * \mathrm{y}\sqrt{\mathrm{y}}}{15}$$

Cálculo del perímetro utilizando la condición de G>1

$$P = \frac{T}{2}\left[(1 + G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G} Ln(G + (1 + G^2)^{\frac{1}{2}})\right]$$

$$\mathbf{P} = \frac{\sqrt{\mathbf{10}} * \mathbf{y}^{\frac{1}{2}}}{\mathbf{5}}\left[(\sqrt{\mathbf{1 + 10y}}) + \frac{\mathbf{1}}{\sqrt{\mathbf{10y}}}\mathbf{Ln}(\sqrt{\mathbf{10y}} + (\sqrt{\mathbf{1 + 10y}}))\right]$$

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$0{,}1 = \frac{(\frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15})^{\frac{5}{3}} * \sqrt{0.003}}{(\frac{\sqrt{10} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10\mathrm{y}}) + \frac{1}{\sqrt{10\mathrm{y}}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10\mathrm{y}} + (\sqrt{1 + 10\mathrm{y}}))\right])^{\frac{2}{3}} * 0{,}033}$$

$$y = \mathbf{0{,}3762\ m}$$

Calcular el área, para luego determinar la velocidad.

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * 0{,}3762\ \sqrt{0{,}3762}}{15}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,1947\ m^2}$$

$$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{A}}$$

$$\mathrm{V} = \frac{0{,}1}{0{,}1947}$$

$$\mathbf{V = 0,5136\frac{m}{s}}$$

Cálculo del perímetro utilizando la condición de G>1

$$\mathrm{P} = \frac{\sqrt{10} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10\mathrm{y}}) + \frac{1}{\sqrt{10\mathrm{y}}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10\mathrm{y}} + (\sqrt{1 + 10\mathrm{y}}))\right]$$

$$\mathrm{P} = \frac{\sqrt{10} * 0{,}3762^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10 * 0{,}3762}) + \frac{1}{\sqrt{10 * 0{,}3762}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10 * 0{,}3762} + (\sqrt{1 + 10 * 0{,}3762}))\right]$$

$$\boldsymbol{Pm = 1,1298\ \ m}$$

Determinar el radio hidráulico para poder determinar luego el flujo

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}1947\ \mathrm{m}^2}{1{,}1298\ \mathrm{m}}$$

$$\boldsymbol{R = 0,1723\ m}$$

$$V * R = \ Velocidad * \ Radio\ hidráulico$$

$$V * R = 0{,}5136\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}1723\ m$$

$$V * R = 0{,}0885$$

$$\boldsymbol{V * R = 0,088}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

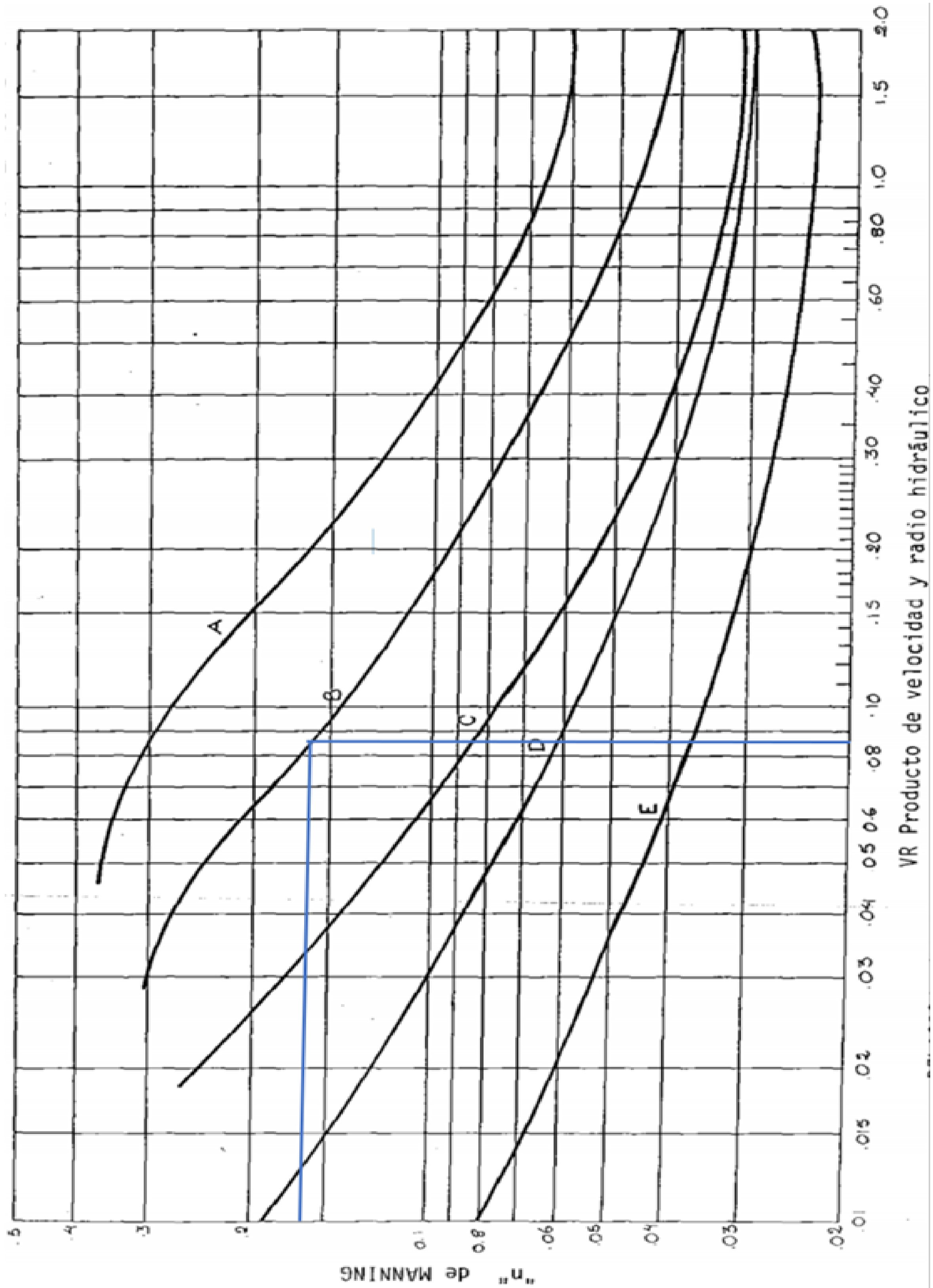

Figura 9: Coeficiente de rugosidad para la primera iteración dando valor **n=0,17**

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$0{,}1 \; = \frac{(\frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15})^{\frac{5}{3}} * \sqrt{0{,}003}}{(\frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{5} * \left[(\sqrt{1+10\text{y}}) + \frac{1}{\sqrt{10\text{y}}}\text{Ln}(\sqrt{10\text{y}} + (\sqrt{1+10\text{y}}))\right])^{\frac{2}{3}} * 0{,}17}$$

y =**0,8643 m**

Calcular el área, para luego determinar la velocidad

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * 0{,}8643 \quad \sqrt{0{,}8643}}{15}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0{,}6775\ m^2}$$

$$\text{V} = \frac{\text{Q}}{\text{A}}$$

$$\text{V} = \frac{0{,}1}{0{,}6775}$$

$$\mathbf{V = 0{,}1476\,\frac{m}{s}}$$

Cálculo del perímetro utilizando la condición de **G>1**

$$\text{P} = \frac{\sqrt{10} * 0{,}8643^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10 * 0{,}8643}) + \frac{1}{\sqrt{10 * 0{,}8643}}\text{Ln}(\sqrt{10 * 0{,}8643} + (\sqrt{1 + 10 * 0{,}8643}))\right]$$

$$\mathbf{Pm = 2{,}184\ m}$$

Determinar el radio hidráulico para poder determinar luego el flujo

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}6775\ \mathrm{m}^2}{2{,}184\ \mathrm{m}}$$

$$\mathbf{R = 0,3102\ m}$$

$$V * R = \ Velocidad * \ Radio\ hidráulico$$

$$V * R = 0{,}1476\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}3102\ m$$

$$V * R = 0{,}0458$$

$$\boldsymbol{V * R = 0,046}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

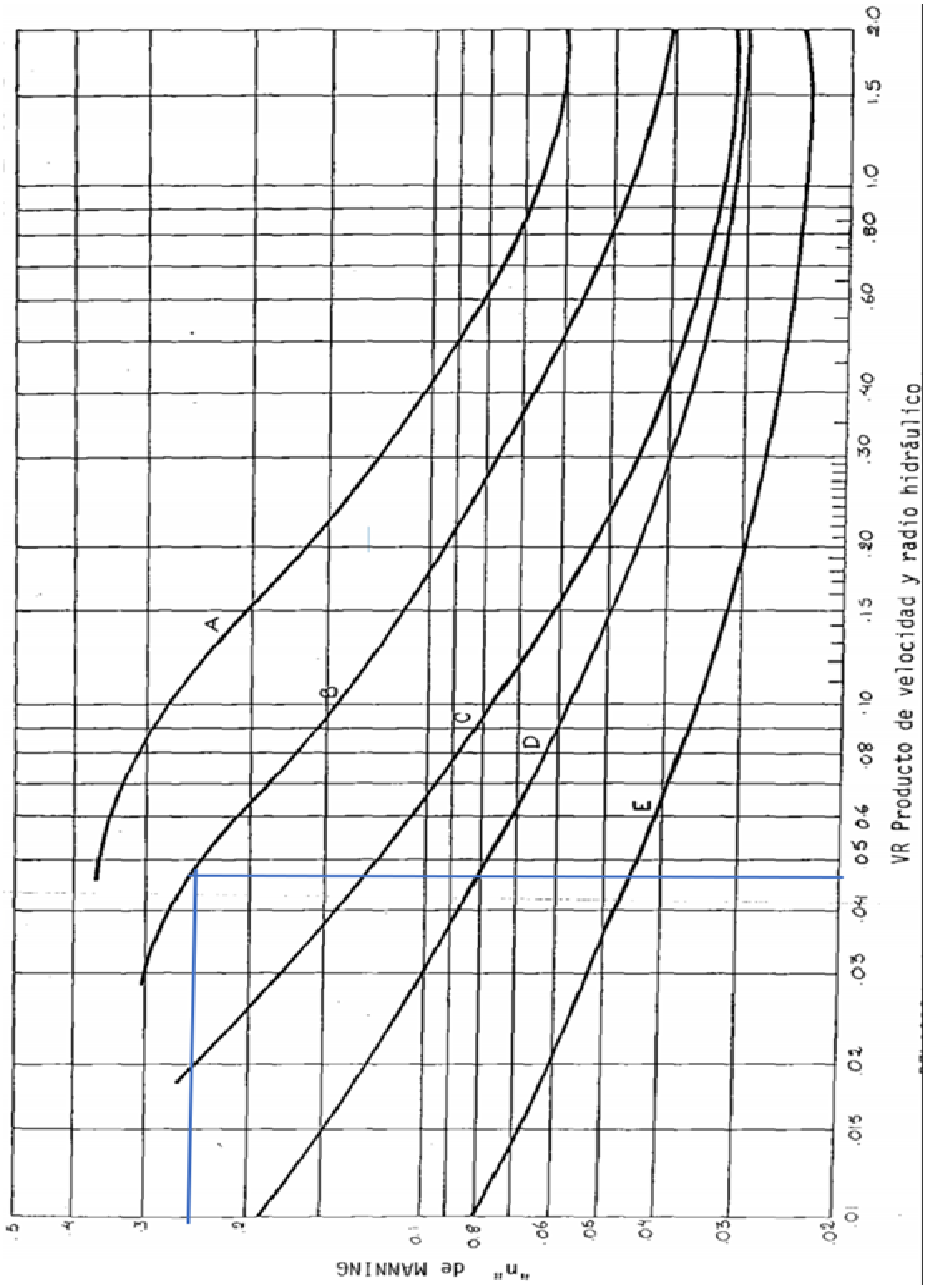

Figura 10: Coeficiente de rugosidad para la segunda iteración dando valor **n=0,25**

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$0.1 = \frac{\left(\frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15}\right)^{\frac{5}{3}} * \sqrt{0{,}003}}{\left(\frac{\sqrt{10} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10\mathrm{y}}) + \frac{1}{\sqrt{10\mathrm{y}}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10\mathrm{y}} + (\sqrt{1 + 10\mathrm{y}}))\right]\right)^{\frac{2}{3}} * 0{,}25}$$

$$\boldsymbol{y} = \mathbf{1{,}0547\ m}$$

Calcular el área, para luego determinar la velocidad

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4\sqrt{10} * \mathrm{y}\sqrt{\mathrm{y}}}{15}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * 1{,}0547 * \sqrt{0{,}7814}}{15}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,7863\ m^2}$$

$$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{A}}$$

$$\mathrm{V} = \frac{0{,}1}{0{,}7863}$$

$$\mathbf{V = 0,1272\,\frac{m}{s}}$$

Cálculo del perímetro utilizando la condición de **G>1**

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$P = \frac{\sqrt{10} * 1{,}0547^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10 * 1{,}0547}) + \frac{1}{\sqrt{10^{\cdot\cdot} * 1{,}0547}} \mathrm{Ln}(\sqrt{10 * 1{,}0547} + (\sqrt{1 + 10 * 1{,}0547}))\right]$$

$$P = \frac{\sqrt{10} * 0{,}3762^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10 * 0{,}3762}) + \frac{1}{\sqrt{10 * 0{,}3762}} \mathrm{Ln}(\sqrt{10 * 0{,}3762} + (\sqrt{1 + 10 * 0{,}3762}))\right]$$

$$\mathbf{Pm = 2,586 \ \ m}$$

Determinar el radio hidráulico para poder determinar luego el flujo

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{0{,}7863 \ \mathrm{m}^2}{2{,}586 \ \ \mathrm{m}}$$

$$\mathbf{R = 0,3040 \ m}$$

$$V * R = \ Velocidad * \ Radio \ hidráulico$$

$$V * R = 0{,}1272 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}3040 \ m$$

$$\boldsymbol{V * R = 0,0386}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

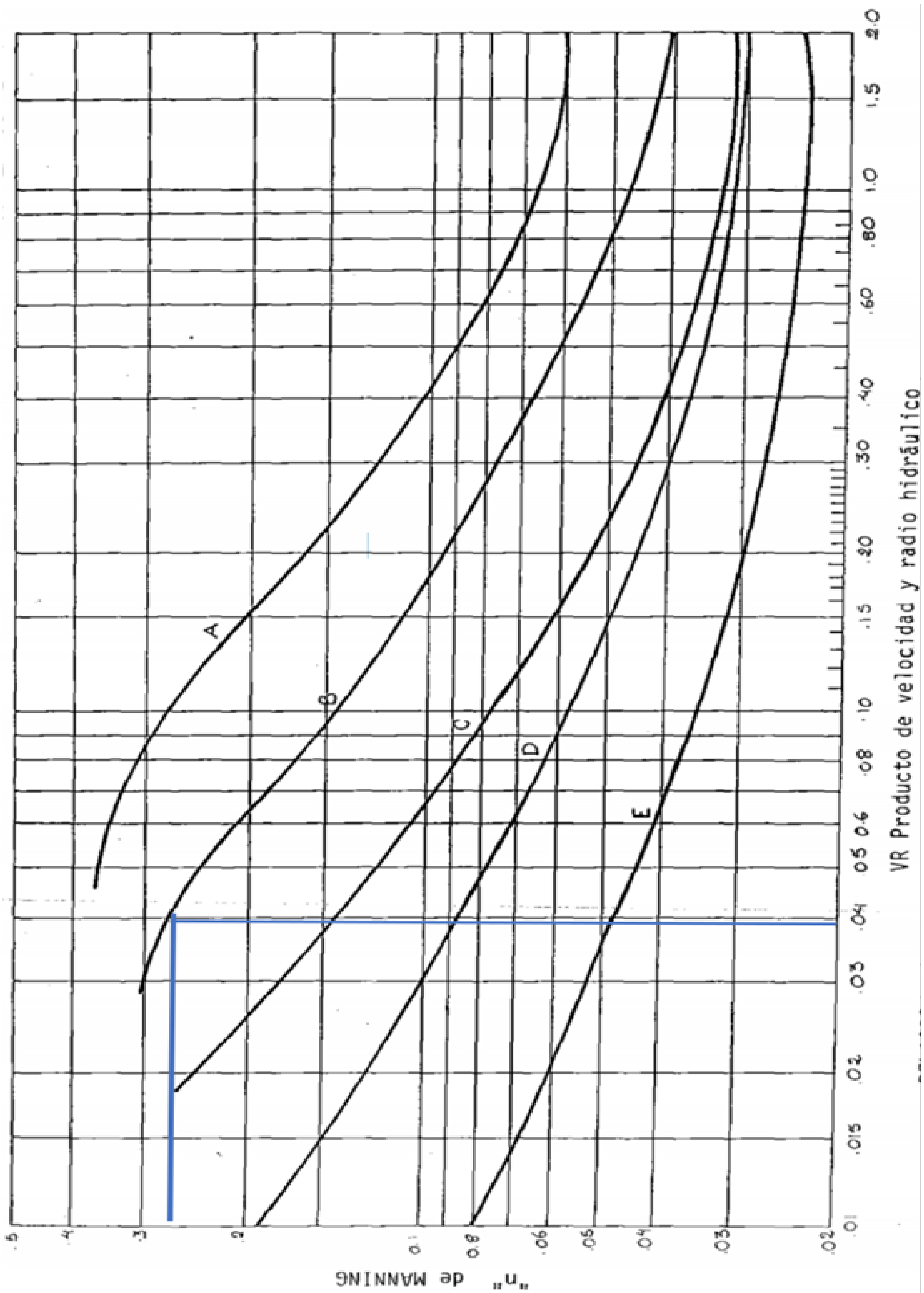

Figura 11: Coeficiente de rugosidad para la tercera iteración dando valor **n=0,27**

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} * \sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}} * n}$$

$$0.1 \; = \frac{(\frac{4\sqrt{10} * y\sqrt{y}}{15})^{\frac{5}{3}} * \sqrt{0{,}003}}{(\frac{\sqrt{10} * y^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10y}) + \frac{1}{\sqrt{10y}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10y} + (\sqrt{1 + 10y}))\right])^{\frac{2}{3}} * 0{,}27}$$

$$\boldsymbol{y} = \mathbf{1{,}0976\ m}$$

Calcular el área, para luego determinar la velocidad

$$\mathrm{Ac1} = \frac{4\sqrt{10} * \mathrm{y}\sqrt{\mathrm{y}}}{15}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{10} * 1{,}0976 \quad \sqrt{1{,}0976}}{15}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,9697\ m^2}$$

$$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{A}}$$

$$\mathrm{V} = \frac{0{,}1}{0{,}9697}$$

$$\mathbf{V = 0,1031\frac{m}{s}}$$

Cálculo del perímetro utilizando la condición de **G>1**

$$\mathrm{P} = \frac{\sqrt{10} * 1{,}0976^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1 + 10 * 1{,}0976}\,) + \frac{1}{\sqrt{10^{\cdot\cdot} * 1{,}0976}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10 * 1{,}0976} + (\sqrt{1 + 10 * 1{,}0976}\,))\right]$$

$$\mathbf{Pm = 2,675\ \ m}$$

Determinar el radio hidráulico para poder determinar luego el flujo

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}9697\ \mathrm{m}^2}{2{,}675\ \ \mathrm{m}}$$

$$\boldsymbol{R = 0,3626\ m}$$

$$V * R = \ Velocidad * \ Radio$$

$$V * R = 0{,}1031\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}3626\,m$$

$$V * R\ = 0{,}0374$$

$$\boldsymbol{V * R = 0,037}$$

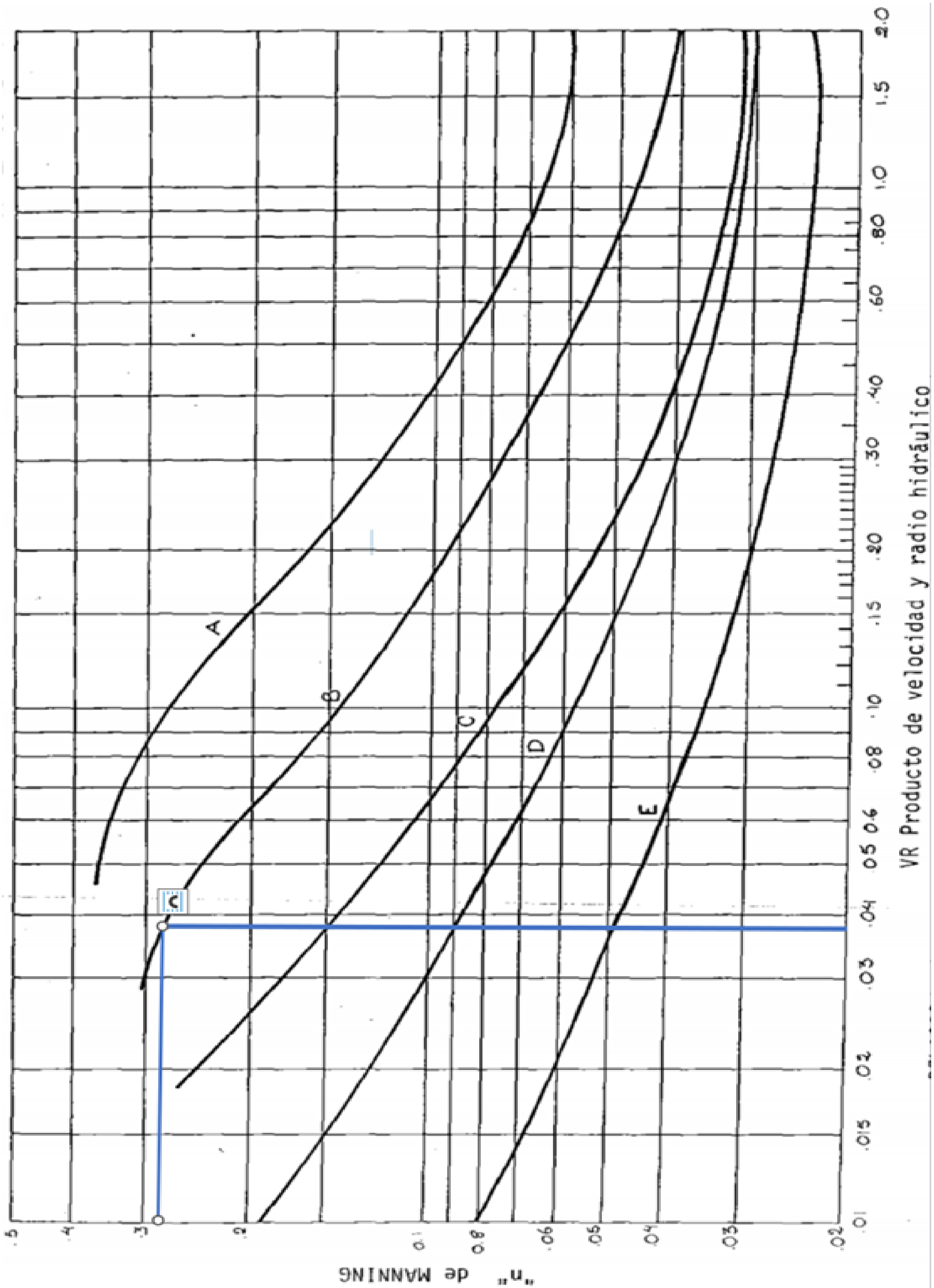

Figura 12: Coeficiente de rugosidad para la cuarta iteración dando valor **n=0,28**

$$Q=\frac{A^{\frac{5}{3}}*\sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}}*n}$$

$$Q=\frac{A^{\frac{5}{3}}*\sqrt{S}}{P^{\frac{2}{3}}*n}$$

$$0{,}1\ =\frac{(\frac{4\sqrt{10}*y\sqrt{y}}{15})^{\frac{5}{3}}*\sqrt{0.003}}{(\frac{\sqrt{10}*\mathrm{y}^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1+10\mathrm{y}})+\frac{1}{\sqrt{10\mathrm{y}}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10\mathrm{y}}+(\sqrt{1+10\mathrm{y}}))\right])^{\frac{2}{3}}*0{,}26}$$

$$y=\mathbf{1{,}1185\ m}$$

Calcular el área, para luego determinar la velocidad

$$Ac1=\frac{4\sqrt{10}*y\sqrt{y}}{15}$$

$$Ac1=\frac{4\sqrt{10}*\ 1{,}1185\ \sqrt{1{,}1185}}{15}$$

$$\boldsymbol{Ac1=0,9975\ m^2}$$

$$\mathrm{V}=\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{A}}$$

$$\mathrm{V}=\frac{0{,}1}{0{,}9975}$$

$$\mathbf{V=0,1002\frac{m}{s}}$$

Cálculo del perímetro utilizando la condición de **G>1**

$$\mathrm{P}=\frac{\sqrt{10}*1{,}1185^{\frac{1}{2}}}{5}\left[(\sqrt{1+10*1{,}1185})+\frac{1}{\sqrt{10*1{,}1185}}\mathrm{Ln}(\sqrt{10*1{,}1185}+(\sqrt{1+10*1{,}1185}))\right]$$

$$\mathbf{Pm = 2,721\ \ m}$$

Determinar el radio hidráulico para poder determinar luego el flujo

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{0{,}9975\ \mathrm{m}^2}{2{,}721\ \ \mathrm{m}}$$

$$\mathbf{R = 0,3664\ m}$$

$$V * R = \ Velocidad * \ Radio\ hidráulico$$

$$V * R = 0{,}1002\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} * 0{,}3664\ m$$

$$V * R\ = 0{,}0367$$

$$\boldsymbol{V * R = 0,037}$$

Este es el mismo valor e VR al anterior por lo que el valor del tirante “y” es el mismo

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Diseño de canal parabólico con $a = 3$

La función matemática que representa el canal es $y = 3 * x^2$ y el canal se representa en la figura 13.

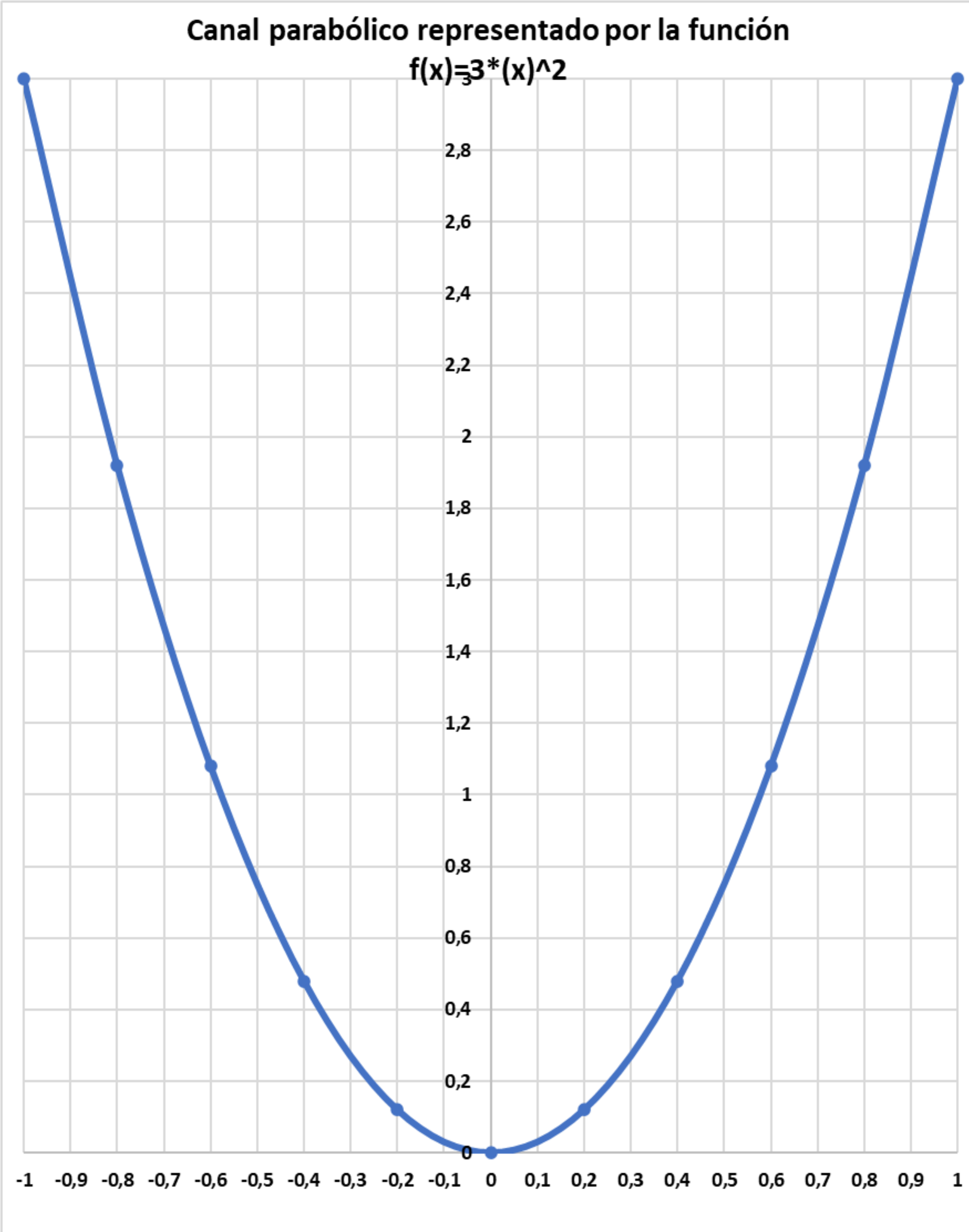

Figura 13: Canal parabólico para la ecuación: $y = 3 * x^2$

Calculando **"f"**

$$f = \frac{2}{\sqrt{a}}$$

$$f = \frac{2}{\sqrt{3}}$$

$$f = \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}$$

$$f = \frac{2\sqrt{3}}{3}$$

$$\boldsymbol{f = \frac{2\sqrt{3}}{3}}$$

Quedando la siguiente relación matemática entre **"T"** y **"y"** es la siguiente:

$$T = f * \sqrt{y}$$

$$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}}$$

Para calcular las áreas y volúmenes de corte primero se debe expresar en términos del espejo de agua **"T"** y el tirante **"y"** para luego poder calcular dichas áreas según la función matemática específica que representa el canal conductor de la acequia de ladera expresando las ecuaciones de las variables hidráulicas de **Ac1**, **Ac2**, **P** y **R** en función de **"y"**.

El cálculo del área hidráulica que es la misma que el área de corte 1 **"Ac1"**:

$$A_{c1} = \frac{2T * y}{3}$$

$$A_{c1} = \frac{2\left(\frac{2 * 3^{\frac{1}{2}}}{3} * y^{\frac{1}{2}}\right) * y}{3}$$

$$A_{c1} = \frac{2 * 2 * 3^{\frac{1}{2}} * y^{\frac{1}{2}} * y}{3 * 3}$$

$$A_{c1} = \frac{4 * 3^{\frac{1}{2}} * y^{\frac{1}{2}+1}}{9}$$

$$\mathbf{A_{c1} = \frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}}}$$

Cálculo del área de corte 2 **“Ac2”** combinando las siguientes ecuaciones:

$$\boldsymbol{A_{c2} = \frac{T^2 * S_t}{200}}$$

$$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}}$$

$$A_{c2} = \frac{\left(\frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}\right)^2 * S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{\left(\frac{2\sqrt{3}}{3}\right)^2 * \left(\sqrt{y}\right)^2 * S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{\frac{2^2\sqrt{3}^2}{3^2} * y * S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{\frac{4}{3} * y * S_t}{200}$$

$$A_{c2} = \frac{4 * y * S_t}{3 * 200}$$

$$A_{c2} = \frac{4 * y * S_t}{600}$$

$$\boldsymbol{A_{c2} = \frac{y * S_t}{150}}$$

Calculando el área de corte total:

$$A_{ct} = A_{c1} + A_{c2}$$

$$A_{ct} = \frac{2T * y}{3} + \frac{T^2 * S_t}{200}$$

$$A_{ct} = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)$$

$$\boldsymbol{A_{ct} = \frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}} + \frac{y * S_t}{150}}$$

A_{ct} = área de corte total (m^2).
Para calcular el volumen de corte total por cada metro lineal del canal:

$$\boldsymbol{V_{ct} = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)(m^2) * 1{,}0\frac{m}{m}}$$

$$\boldsymbol{V_{ct}\left(\frac{m^3}{m}\right) = T\left(\frac{2y}{3} + \frac{T * S_t}{200}\right)}$$

$$\boldsymbol{V_{ct}\left(\frac{m^3}{m}\right) = \frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}} + \frac{y * S_t}{150}}$$

Definición de **"y"** en términos de **"T"**

$$T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}$$

$$\frac{T}{\left(\frac{2\sqrt{3}}{3}\right)} = \sqrt{y}$$

$$\left(\frac{T}{\left(\frac{2\sqrt{3}}{3}\right)}\right)^2 = \left(\sqrt{y}\right)^2$$

$$\frac{T^2}{\left(\frac{2\sqrt{3}}{3}\right)^2} = y$$

$$\frac{T^2}{\left(\frac{2^2\sqrt{3}^2}{3^2}\right)} = y$$

$$\frac{T^2}{\left(\frac{4}{3}\right)} = y$$

$$\boldsymbol{y = \frac{3T^2}{4}}$$

$$\boldsymbol{y = 0,75 * T^2}$$

Variables hidráulicas del perímetro mojado “P”, radio hidráulico “R” y el tirante hidráulico “y”:

0 < G ≤ 1:

Combinando las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}}$$

$$\mathbf{Pm = \frac{3T^2+8y^2}{3T}}$$

$$P = \frac{3\left(\frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}\right)^2 + 8y^2}{3 * \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}\right)}$$

$$P = \frac{3 * \frac{2^2\sqrt{3}^2}{3^2} * \sqrt{y}^2 + 8y^2}{3 * \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}\right)}$$

$$P = \frac{3 * \frac{4 * 3}{9} * y + 8y^2}{2\sqrt{3} * \sqrt{y}}$$

$$P = \frac{3 * \frac{4}{3} * y + 8y^2}{2\sqrt{3} * \sqrt{y}}$$

$$P = \frac{4y + 8y^2}{2\sqrt{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{4y * (1 + 2y)}{2\sqrt{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$P = \frac{4y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)}{2\sqrt{3}} * \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}$$

$$P = \frac{4y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y) * \sqrt{3}}{6}$$

$$P = \frac{2y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y) * \sqrt{3}}{3}$$

$$\boldsymbol{P = \frac{2 * 3^{\frac{1}{2}} * y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)}{3}}$$

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{P}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{\frac{4\sqrt{3}}{9} * \mathrm{y}^{\frac{3}{2}}}{\frac{2 * 3^{\frac{1}{2}} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}} * (1 + 2\mathrm{y})}{3}}$$

$$\mathrm{R} = \frac{3 * \left(4\sqrt{3} * \mathrm{y}^{\frac{3}{2}}\right)}{9 * (2 * 3^{\frac{1}{2}} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}} * (1 + 2\mathrm{y}))}$$

$$\mathrm{R} = \frac{4\sqrt{3} * \mathrm{y}^{\frac{3}{2}}}{3 * 2\sqrt{3} * \mathrm{y}^{\frac{1}{2}} * (1 + 2\mathrm{y})}$$

$$R = \frac{2 * y^{\frac{3}{2}-\frac{1}{2}}}{3 * (1 + 2y)}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{2y}{3(1 + 2y)}}$$

Para el tirante:

$$\mathbf{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

Donde:
Q: caudal (m3/s) máximo en la acequia de ladera
A: área (m2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del canal (m/m)
n: coeficiente de rugosidad

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = A * R^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = A * \frac{A^{\frac{2}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{\left(\frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left(\frac{2 * 3^{\frac{1}{2}} * y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)}{3}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{\frac{4*3^{\frac{5}{6}}}{9^{\frac{5}{3}}}*y^{\frac{5}{2}}}{\frac{2^{\frac{2}{3}}*3^{\frac{1}{3}}*y^{\frac{1}{3}}*(1+2y)^{\frac{2}{3}}}{3^{\frac{2}{3}}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{\frac{4*3^{\frac{5}{6}}}{3^{2*\frac{5}{3}}}*y^{\frac{5}{2}}}{\frac{2^{\frac{2}{3}}*3^{\frac{1}{3}}*y^{\frac{1}{3}}*(1+2y)^{\frac{2}{3}}}{3^{\frac{2}{3}}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{\frac{4*3^{\frac{5}{6}}}{3^{\frac{10}{3}}}*y^{\frac{5}{2}}}{\frac{2^{\frac{2}{3}}*3^{\frac{1}{3}}*y^{\frac{1}{3}}*(1+2y)^{\frac{2}{3}}}{3^{\frac{2}{3}}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{4*3^{\frac{5}{6}}*y^{\frac{5}{2}}*3^{\frac{2}{3}}}{2^{\frac{2}{3}}*3^{\frac{1}{3}}*y^{\frac{1}{3}}*(1+2y)^{\frac{2}{3}}*3^{\frac{10}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{2^{2}*3^{\frac{3}{2}}*y^{\frac{5}{2}}}{2^{\frac{2}{3}}*3^{\frac{11}{3}}*y^{\frac{1}{3}}*(1+2y)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{2^{2-\frac{2}{3}}*3^{\frac{3}{2}-\frac{11}{3}}*y^{\frac{5}{2}-\frac{1}{3}}}{(1+2y)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{2^{\frac{4}{3}}*3^{-\frac{13}{6}}*y^{\frac{13}{6}}}{(1+2y)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=\frac{2^{\frac{4}{3}}*y^{\frac{13}{6}}}{3^{\frac{13}{6}}*(1+2y)^{\frac{2}{3}}}$$

$$\frac{Q * n * 3^{\frac{13}{6}}}{2^{\frac{4}{3}} * S^{\frac{1}{2}}} = \frac{y^{\frac{13}{6}}}{(1+2y)^{\frac{2}{3}}}$$

Se define “m” como una constante

$$m = \frac{Q * n * 3^{\frac{13}{6}}}{2^{\frac{4}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

$$m = \frac{y^{\frac{13}{6}}}{(1+2y)^{\frac{2}{3}}}$$

$$y^{\frac{13}{6}} = m * \ (1+2y)^{\frac{2}{3}}$$

$$\left(y^{\frac{13}{6}}\right)^{\frac{3}{2}} = m^{\frac{3}{2}} * \left((1+2y)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$y^{\frac{13}{4}} = m^{\frac{3}{2}} * (1+2y)$$

$$y^{\frac{13}{4}} = m^{\frac{3}{2}} + 2m^{\frac{3}{2}}y$$

$$\boldsymbol{y^{\frac{13}{4}} - m^{\frac{3}{2}} - 2m^{\frac{3}{2}}y = 0}$$

$$m = \frac{Q * n * 3^{\frac{13}{6}}}{2^{\frac{4}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

$$y^{\frac{13}{4}} - m^{\frac{3}{2}} - 2m^{\frac{3}{2}}y = 0$$

$$\boldsymbol{y^{\frac{13}{4}} - \left(\frac{Q * n * 3^{\frac{13}{6}}}{2^{\frac{4}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{3}{2}} - 2 * \left(\frac{Q * n * 3^{\frac{13}{6}}}{2^{\frac{4}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{3}{2}} y = 0}$$

$$\mathrm{y}^{\frac{13}{4}} - \frac{\mathrm{Q}^{\frac{3}{2}} * \mathrm{n}^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{6}*\frac{3}{2}}}{2^{\frac{4}{3}*\frac{3}{2}} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2}*\frac{3}{2}}} - 2 * \frac{\mathrm{Q}^{\frac{3}{2}} * \mathrm{n}^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{6}*\frac{3}{2}}}{2^{\frac{4}{3}*\frac{3}{2}} * \mathrm{S}^{\frac{1}{2}*\frac{3}{2}}} * \mathrm{y} = 0$$

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$y^{\frac{13}{4}} - \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{2^2 * S^{\frac{3}{4}}} - 2 * \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{2^2 * S^{\frac{3}{4}}} * y = 0$$

$$\mathbf{y^{\frac{13}{4}} - 2 * \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * S^{\frac{3}{4}}} * y - \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * S^{\frac{3}{4}}} = 0}$$

$$\mathbf{y^{\frac{13}{4}} - \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{2 * S^{\frac{3}{4}}} * y - \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * S^{\frac{3}{4}}} = 0}$$

Para resolver la Ecuación se puede realizar por el método del tanteo o por el método gráfico o cualquier otro método.

Se va a realizar un ejemplo con los siguientes datos:

Q = 0,1 m^3/s

S = 0,003 m/m

n = 0,033

$$y^{\frac{13}{4}} - \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * S^{\frac{3}{4}}} - 2 * \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * S^{\frac{3}{4}}} * y = 0$$

$$y^{\frac{13}{4}} - \frac{0{,}1^{\frac{3}{2}} * 0{,}033^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * 0{,}003^{\frac{3}{4}}} - 2 * \frac{0{,}1^{\frac{3}{2}} * 0{,}033^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * 0{,}003^{\frac{3}{4}}} * y = 0$$

$$y^{\frac{13}{4}} - 0{,}1313754012 - 0{,}2627508024y = 0$$

$$\boldsymbol{y = 0,701305\ m}$$

Se calculará el caudal por medio del valor de **“y”** para comprobar el valor encontrado.

$$\mathbf{T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}}$$

$$\mathbf{Ac1 = \frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}}}$$

$$\mathbf{P = \frac{2 * 3^{\frac{1}{2}} * y^{\frac{1}{2}} * (1+2y)}{3}}$$

$$T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{0{,}701305}$$

$$\boldsymbol{T = 0,966992\ m}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{3}}{9} * (0{,}701305)^{\frac{3}{2}}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,452104\ m^2}$$

$$P = \frac{2 * 3^{\frac{1}{2}} * (0{,}701305)^{\frac{1}{2}} * (1 + 2 * 0{,}701305)}{3}$$

$$\boldsymbol{P = 2,323304\ m}$$

$$R = \frac{A}{P}$$

$$R = \frac{0{,}452104}{2{,}323304}$$

$$\boldsymbol{R = 0,194595\ m}$$

Ahora calculando el caudal:

$$\mathbf{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:
Q: caudal (m^3/s) máximo en la acequia de ladera
A: área (m^2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del canal (m/m)
n: coeficiente de rugosidad

$$R^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{A}{P}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$R^{\frac{2}{3}} = (0{,}194595)^{\frac{2}{3}}$$

$$R^{\frac{2}{3}} = 0{,}335805\ m$$

$$Q = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

$$Q = \frac{0{,}452104 * 0{,}335805 * \sqrt{0{,}003}}{0{,}033}$$

$$Q = 0{,}251983\ {}^{m^2}/_{s}$$

Se puede observar que el caudal que se calculó es mayor al caudal que se definió en el ejemplo, lo que nos dice que este caso no se puede aplicar, por lo cual se debe de revisar el valor de "**G**" para la función matemática definida para el canal conductor de la acequia de ladera parabólica.

Estimación de **G**:

$$G = \frac{4y}{T}$$

$$G = \frac{4y}{\frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}}$$

$$G = \frac{4y}{\frac{2\sqrt{3}}{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$G = \frac{3 * 4 * y^{\frac{1}{2}}}{2\sqrt{3}}$$

$$G = \frac{12y^{\frac{1}{2}}}{2\sqrt{3}}$$

$$G = \frac{6y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3}}$$

$$G = \frac{6y^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3}} * \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}}$$

$$G = \frac{6\sqrt{3} * y^{\frac{1}{2}}}{3}$$

$$\boldsymbol{G = 2\sqrt{3} * y^{\frac{1}{2}}}$$

$$\boldsymbol{G = 2\sqrt{3} * \sqrt{y}}$$

donde: **G > 1**

Se debe de cumplir para este caso **"a"** que:

$$G > 1$$

$$2\sqrt{3} * \sqrt{y} > 1$$

$$\sqrt{y} > \frac{1}{2\sqrt{3}}$$

$$(\sqrt{y})^2) > (\frac{1}{2\sqrt{3}})^2$$

$$y > \frac{1}{4 * 3}$$

$$\boldsymbol{y > \frac{1}{12}}$$

G > 1 siempre que se cumpla que $\boldsymbol{y > 0,083\ m}$

El **"y"** calculado debe de ser mayor a **0,083 m** para poder usar el caso **G > 1** y el tirante **"y"** calculado bajo esta condición cumple ya que el valor es de $\boldsymbol{y = 0,701305\ m}$

Combinando las siguientes ecuaciones:

$\boldsymbol{T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}}$

$\boldsymbol{G = 2\sqrt{3} * \sqrt{y}}$

$\boldsymbol{P = \frac{T}{2}\left[(1 + G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G}\ln\left(G + (1 + G^2)^{\frac{1}{2}}\right)\right]}$

$$P = \frac{T}{2}\left[(1+G^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{G}\ln\left(G + (1+G^2)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

$$P = \frac{\frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}}{2}\left[\left(1 + \left(2\sqrt{3} * \sqrt{y}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2\sqrt{3} * \sqrt{y}}\ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + \left(1 + (2\sqrt{3} * \sqrt{y})^2\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

$$P = \frac{2\sqrt{3} * \sqrt{y}}{6}\left[\left(1 + \left(2\sqrt{3} * \sqrt{y}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2\sqrt{3} * \sqrt{y}}\ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + \left(1 + (2\sqrt{3} * \sqrt{y})^2\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

Definiendo ***"u"*** como una constante:

$$u = 2\sqrt{3} * \sqrt{y}$$

$$u^2 = (2\sqrt{3} * \sqrt{y})^2 \;\rightarrow\; u^2 = 12y$$

$$P = \frac{u}{6}\left[(1+u^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{u}\ln\left(u + (1+u^2)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

$$P = \frac{u}{6}(1+u^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{6}\ln\left(u + (1+u^2)^{\frac{1}{2}}\right)$$

$$P = \frac{1}{6}\left[u * (1+u^2)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(u + (1+u^2)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

Volviendo a términos de **"y"**

$$\boldsymbol{P = \frac{1}{6}\left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1+12y)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]}$$

Cálculo del radio hidráulico

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{\frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}}}{\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1+12y)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$R = \frac{6 * \left(4\sqrt{3} * y^{\frac{3}{2}}\right)}{9 * \left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]}$$

$$R = \frac{2 * \left(4\sqrt{3} * y^{\frac{3}{2}}\right)}{3 * \left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]}$$

$$R = \frac{8\sqrt{3} * y^{\frac{3}{2}}}{3\left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]}$$

$$\boldsymbol{R = \frac{8\sqrt{3} * y^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + 3 * \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)}}$$

Cálculo de **"y"**:

$$\mathbf{Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:
Q: caudal (m^3/s) máximo en la acequia de ladera
A: área (m^2)
R: radio hidráulico (m)
S: pendiente del canal (m/m)
n: coeficiente de rugosidad

$$\frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}} = \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} \rightarrow \frac{0{,}1 * 0{,}033}{\sqrt{0{,}003}} = 0{,}060249$$

$$\frac{A^{\frac{5}{3}}}{P^{\frac{2}{3}}} = 0{,}060249$$

$$\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}*y^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}=\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}}*\left(y^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{5}{3}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}=\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}$$

$$\boldsymbol{\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}}*y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=0}$$

Ejemplo: Se toman los mismos datos del ejemplo anterior para dar la solución calculando "y"
Q = 0,1 m^3/s
S = 0,003
n = 0,033
Cálculo de "y":

$$\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}}*y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{Q*n}{S^{\frac{1}{2}}}=0$$

$$\frac{0{,}646592*y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}-0{,}060249=0$$

$$\boldsymbol{y=0,400234\ m}$$

Se cumple que y > 0,083 m
Cálculo de **"T"**:

$$T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}$$

$$T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{0{,}400234}$$

$$\boldsymbol{T = 0,730510\ m}$$

Cálculo del área hidráulica que es el área de corte 1:

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}}$$

$$Ac1 = \frac{4\sqrt{3}}{9} * (0{,}400234)^{\frac{3}{2}}$$

$$\boldsymbol{Ac1 = 0,194917\ m^2}$$

Cálculo del perímetro mojado:

$$P = \frac{1}{6}\left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

$$P = \frac{1}{6}\left[2\sqrt{3} * \sqrt{0{,}400234} * (1 + 12(0{,}400234))^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{0{,}400234} + (1 + 12(0{,}400234))^{\frac{1}{2}}\right)\right]$$

$$\boldsymbol{P = 1,134222\ m}$$

Cálculo del radio hidráulico:

$$\mathbf{R = \frac{A}{P}}$$

$$R = \frac{0{,}194917}{1{,}134222}$$

$$\boldsymbol{R = 0,171850\ m}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

$$R^{\frac{2}{3}} = (0{,}171850)^{\frac{2}{3}}$$

$$\boldsymbol{R^{\frac{2}{3}} = 0,309100\ m}$$

Cálculo del caudal utilizando Manning para comprobar que los valores son correctos:

$$Q = \frac{AR^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

$$Q = \frac{0{,}194917 * 0{,}309100 * 0{,}003^{\frac{1}{2}}}{0{,}033}$$

$$\boldsymbol{Q = 0,099998\ {m^3}/{s}}$$

Redondeando el valor del caudal calculado

$$\boldsymbol{Q = 0,1\ {m^3}/{s}}$$

Donde se logra comprobar que el caudal calculado es prácticamente igual al caudal propuesto para el ejemplo por lo que es correcto utilizar la segunda opción para los cálculos respectivos.

$$\boldsymbol{y = 3 * x^2}$$

Calculando el área de corte 2 “Ac2”

$\boldsymbol{y = 0,400234\ m}$

$\boldsymbol{T = 0,730510\ m}$

$\boldsymbol{S_t = 30}$

$$Ac2 = \frac{T^2 * S_t}{200}$$

$$Ac2 = \frac{(0{,}730510)^2 * 30}{200}$$

$$Ac2 = 0{,}080047$$

Calculando el volumen de corte por metro para este caso:

$$V_{ct}\left(\frac{m^3}{m}\right)=\frac{4\sqrt{3}}{9}*y^{\frac{3}{2}}+\frac{y*S_t}{150}$$

$$V_{ct}\left(\frac{m^3}{m}\right)=\frac{4\sqrt{3}}{9}*(0{,}400234)^{\frac{3}{2}}+\frac{0{,}400234*30}{150}$$

$$V_{ct}\left(\frac{m^3}{m}\right)=0{,}194917+0{,}080047$$

$$\boldsymbol{V_{ct}\left(\frac{m^3}{m}\right)=0,274964}$$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Cuadro 3: Resumen de las ecuaciones fundamentales para las variables hidráulicas de los canales parabólico para una función definida como $y = 3 * x^2$

Valor de "a"		$a = 3$
$f = \frac{2}{\sqrt{a}}$		$f = \frac{2\sqrt{3}}{3}$
$T = f * \sqrt{y}$		$T = \frac{2\sqrt{3}}{3} * \sqrt{y}$
Área hidráulica o Ac1	$Ac1 = \frac{2T * y}{3}$	$A_{c1} = \frac{4\sqrt{3}}{9} * y^{\frac{3}{2}}$
Valor de G	$G = \frac{4y}{T}$	$G = 2\sqrt{3} * y^{\frac{1}{2}}$
Perímetro mojado condición 0<G≤1	$Pm = T + \frac{8y^2}{3T}$	$P = \frac{2 * 3^{\frac{1}{2}} * y^{\frac{1}{2}} * (1 + 2y)}{3}$
Radio hidráulico condición 0<G≤1	$R = \frac{2 * T^2 * y}{3 * T^2 + 8 * y^2}$	$R = \frac{2y}{3(1 + 2y)}$
Perímetro mojado: condición G > 1	$Pm = \frac{T}{2}\left[(1 + (\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} Ln(\frac{4y}{T} + (1 + ((\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}})\right]$	$P = \frac{1}{6}\left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]$
Radio hidráulico para la condición G > 1	$R = \frac{\frac{2T * y}{3}}{\frac{T}{2}\left[(1 + (\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{T}{4y} Ln(\frac{4y}{T} + (1 + ((\frac{4y}{T})^2)^{\frac{1}{2}})\right]}$	$R = \frac{8\sqrt{3} * y^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + 3 * \ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)}$
Tirante "y" hidráulico condición 0<G≤1	$y^{\frac{13}{4}} - 2 * \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * S^{\frac{3}{4}}} * y - \frac{Q^{\frac{3}{2}} * n^{\frac{3}{2}} * 3^{\frac{13}{4}}}{4 * S^{\frac{3}{4}}} = 0$	
Tirante "y" hidráulico: condición G > 1	$\frac{\left(\frac{4 * 3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}} * y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3} * \sqrt{y} * (1 + 12y)^{\frac{1}{2}} + ln\left(2\sqrt{3} * \sqrt{y} + (1 + 12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}} - \frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = 0$	

Ejemplo de cálculo de la rugosidad para un canal empastado con las condiciones antes vistas

$\mathbf{Q = 0,1\ {}^{m^3}/_{s}}$
$\mathbf{s = 0,003}$
$\mathbf{n = 0,033}$
$\mathbf{y = 0,400234\ m}$
$\mathbf{A = 0,194917\ m^2}$
$\mathbf{P = 1,134222\ m}$
$\mathbf{R = 0,171850\ m}$

Con estas condiciones se procede a calcular v.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{0{,}1\ {}^{m^3}/_{s}}{0{,}194917\ m^2}$$

$$\boxed{v = 0{,}513039\ m/s}$$

Con estas condiciones se procede a calcular R*V para entrar a la tabla y encontrar el nuevo "n" esto para la condición "B", al final se podrá observar un par de tablas que detallan las distintas condiciones

$$R * v = 0{,}171850 \cdot 0{,}513039$$

$$\boxed{R * v = 0{,}0882 \approx 0{,}09}$$

Con este valor se procede a entrar al siguiente grafico para determinar el nuevo n:

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

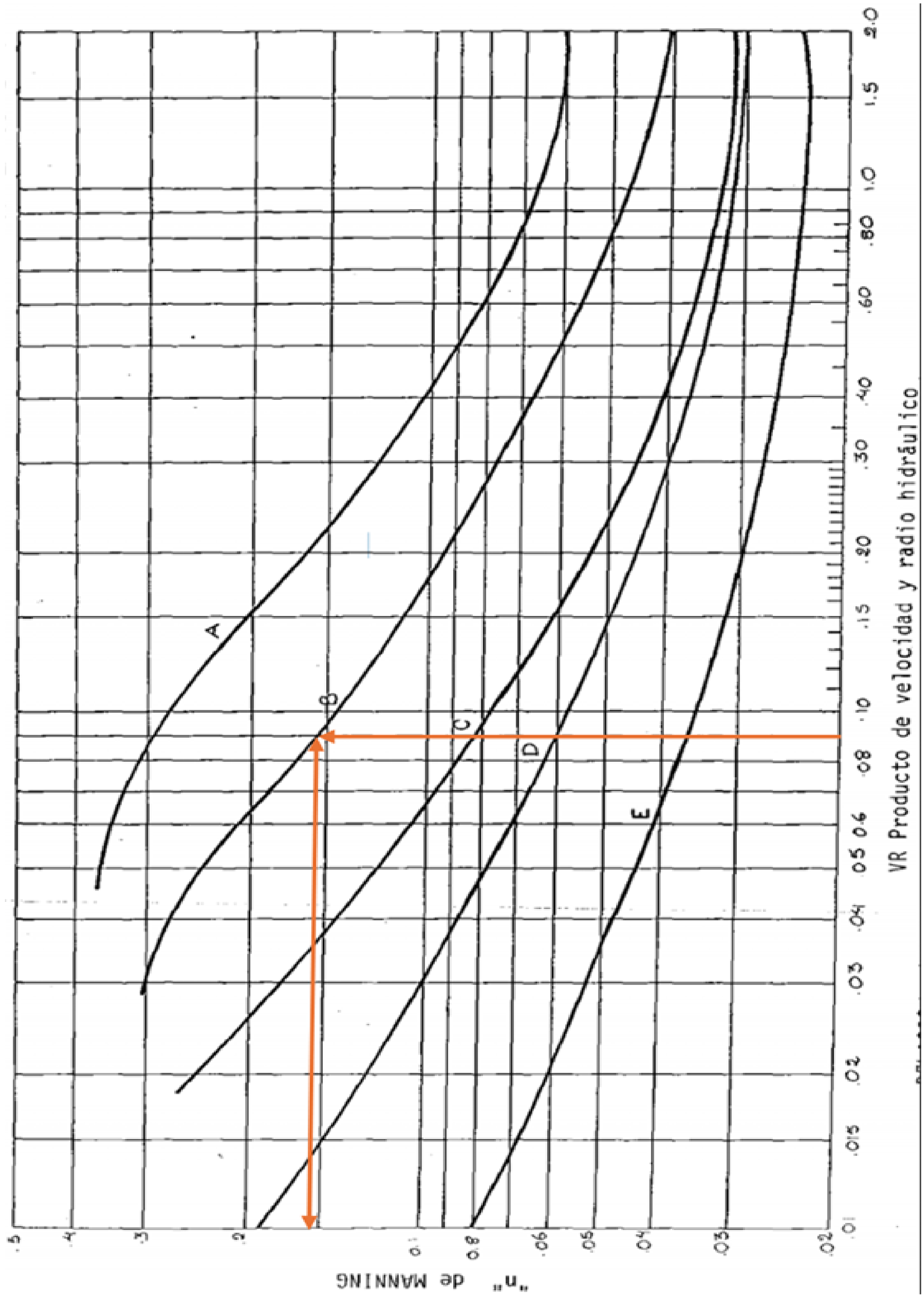

Figura 14: Coeficiente de rugosidad para la primera iteración dando valor **n=0,16**

Siendo un valor sumamente diferente al dado al inicio en el que se suponía tener unas condiciones de pasto muy bajo, pero con este proceso se estaría encontrando el valor real o al menos el más cercano en condiciones reales, con pastos altos. Ahora teniendo el nuevo n se proceden a recalcular todos los parámetros.

$$\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}}*y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{0,1*0,16}{(0,003)^{\frac{1}{2}}}=0$$

$$\boxed{y=0,897296\ \mathrm{m}}$$

$$A=\frac{4\sqrt{3}}{9}*(0,897296)^{\frac{3}{2}}$$

$$\boxed{A=0,654307\ \mathrm{m}^2}$$

$$v=\frac{0,1\ \mathrm{m}^3/_\mathrm{s}}{0,654307\ \mathrm{m}^2}$$

$$\boxed{v=0,152833\ \mathrm{m/s}}$$

$$R=\frac{8\sqrt{3}*(0,897296)^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{3}*\sqrt{0,897296}*(1+12(0,897296))^{\frac{1}{2}}+3*\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{0,897296}+(1+12(0,897296))^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$\boxed{R=0,298309\ \mathrm{m}}$$

Calculando R*V

$$R*V=0,298309\cdot 0,152833$$

$$\boxed{R*V=0,04559\approx 0,046}$$

Con este valor se procede a entrar a la siguiente tabla para determinar el nuevo n:

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

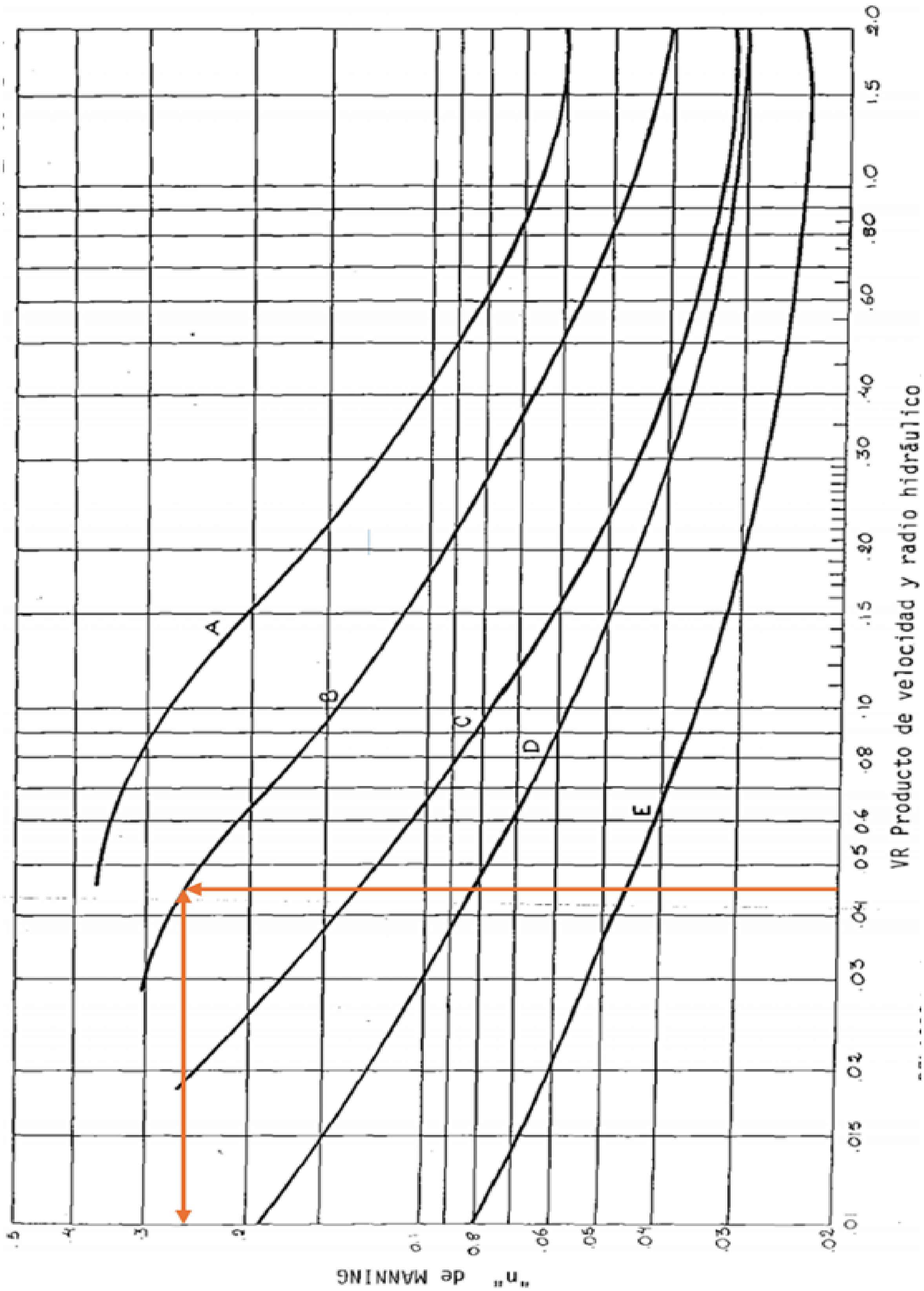

Figura 15: Coeficiente de rugosidad para la segunda iteración dando valor **n=0,26**

Ahora teniendo el nuevo n se proceden a recalcular todos los parámetros.

$$\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}} * y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{0{,}1*0{,}26}{(0{,}003)^{\frac{1}{2}}}=0$$

$$\boxed{y = 1{,}15506\ \mathrm{m}}$$

$$A = \frac{4\sqrt{3}}{9} * (1{,}15506\ )^{\frac{3}{2}}$$

$$\boxed{A = 0{,}95562\ \mathrm{m}^2}$$

$$v = \frac{0{,}1\ {}^{\mathrm{m}^3}/_{\mathrm{s}}}{0{,}95562\ \mathrm{m}^2}$$

$$\boxed{v = 0{,}10464\ \mathrm{m/s}}$$

$$R = \frac{8\sqrt{3} * (1{,}15506\ )^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{3}*\sqrt{1{,}15506\ }*(1+12(1{,}15506\ ))^{\frac{1}{2}}+3*\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{1{,}15506\ }+(1+12(1{,}15506\ ))^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$\boxed{R = 0{,}33696\ \mathrm{m}}$$

Calculando R*V

$$R * V = 0{,}33696 * 0{,}10464$$

$$\boxed{R * V = 0{,}03526 \approx 0{,}035}$$

Con este valor se procede a entrar a la siguiente tabla para determinar el nuevo n:

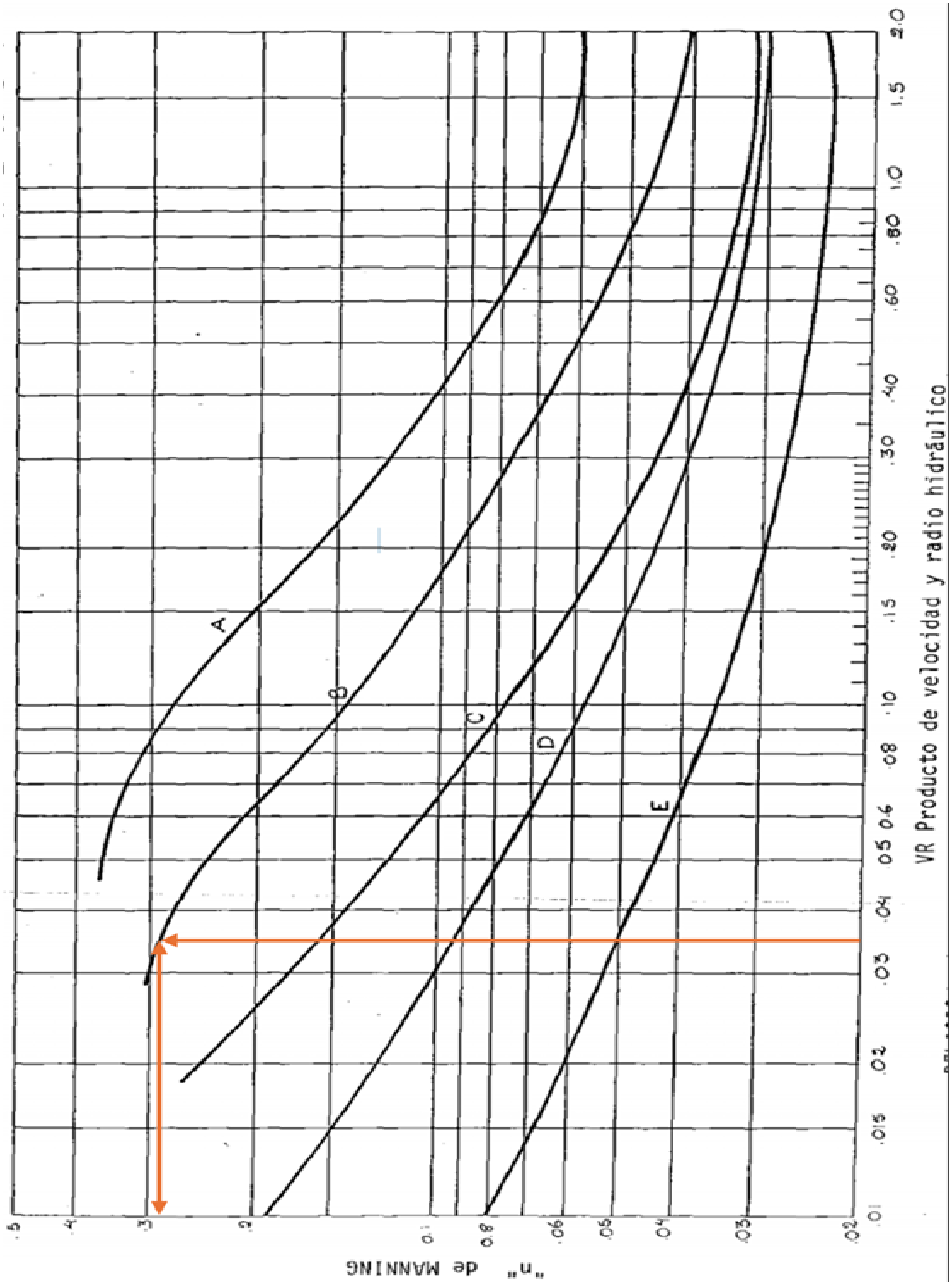

Figura 16: Coeficiente de rugosidad para la segunda iteración dando valor **n=0,28**

Ahora teniendo el nuevo n se proceden a recalcular todos los parámetros.

$$\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}}*y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{0{,}1*0{,}28}{(0{,}003)^{\frac{1}{2}}}=0$$

$$\boxed{y = 1{,}20064\ \mathrm{m}}$$

$$A=\frac{4\sqrt{3}}{9}*(1{,}20064\ )^{\frac{3}{2}}$$

$$\boxed{A = 1{,}01274\ \mathrm{m}^2}$$

$$v=\frac{0{,}1\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s}}{1{,}01274\ \ \mathrm{m}^2}$$

$$\boxed{v = 0{,}09874\ \mathrm{m/s}}$$

$$R=\frac{8\sqrt{3}*(1{,}20064\ )^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{3}*\sqrt{1{,}20064}*(1+12(1{,}20064\ ))^{\frac{1}{2}}+3*\ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{1{,}20064}+(1+12(1{,}20064\ ))^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$\boxed{R = 0{,}34524\ \mathrm{m}}$$

Calculando R*V

$$R*V=0{,}34524*0{,}09874$$

$$\boxed{R*V = 0{,}03409 \approx 0{,}034}$$

Con este valor se procede a entrar a la siguiente tabla para determinar el nuevo n:

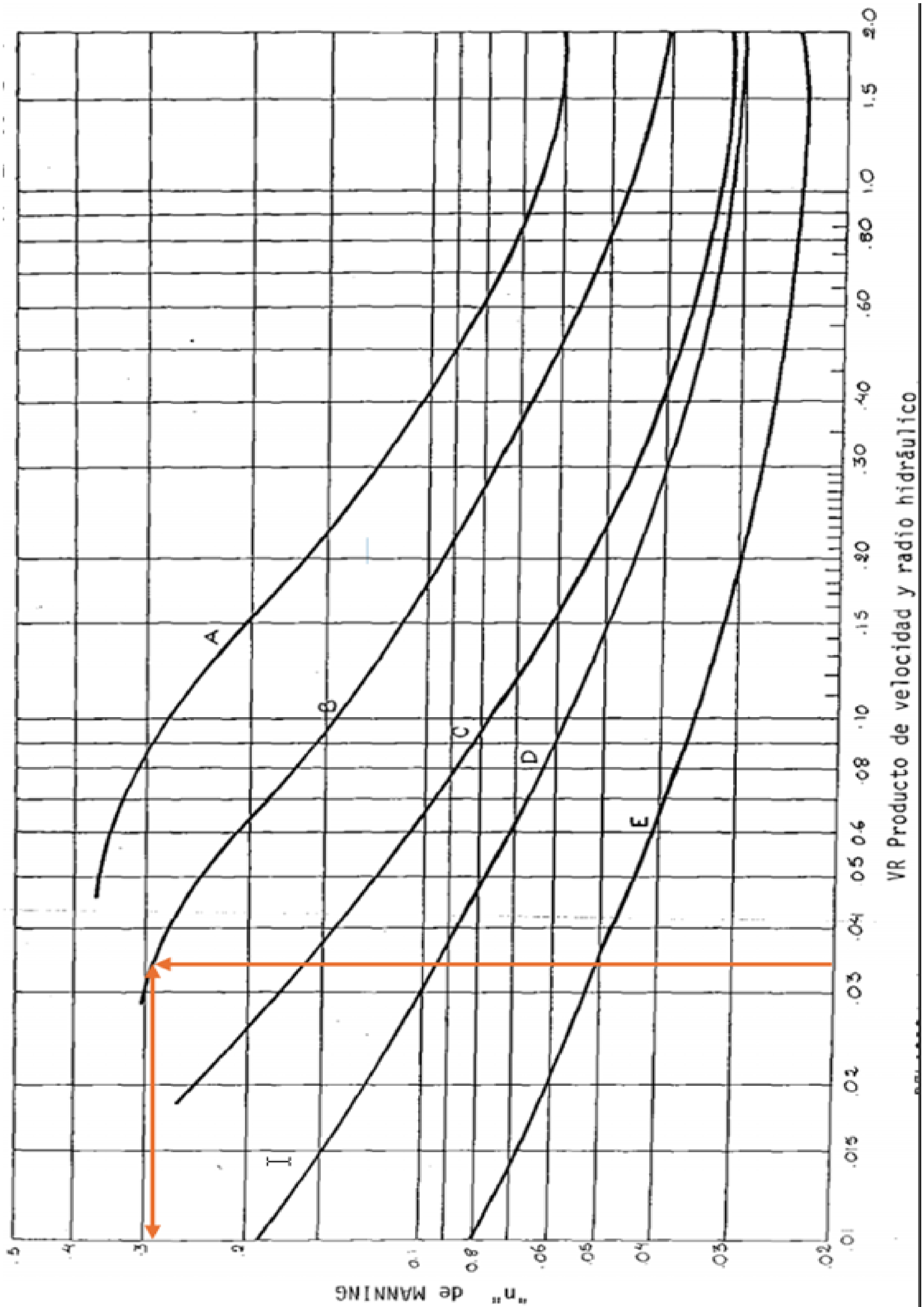

Figura 17: Coeficiente de rugosidad para la segunda iteración dando valor n=0,29

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Ahora teniendo el nuevo n se proceden a recalcular todos los parámetros.

$$\frac{\left(\frac{4*3^{\frac{1}{2}}}{9}\right)^{\frac{5}{3}} * y^{\frac{5}{2}}}{\left[\frac{1}{6}\left[2\sqrt{3}*\sqrt{y}*(1+12y)^{\frac{1}{2}}+ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{y}+(1+12y)^{\frac{1}{2}}\right)\right]\right]^{\frac{2}{3}}}-\frac{0{,}1*0{,}29}{(0{,}003)^{\frac{1}{2}}}=0$$

$$\boxed{y = 1{,}22286\, m}$$

$$A=\frac{4\sqrt{3}}{9}*(1{,}22286)^{\frac{3}{2}}$$

$$\boxed{A = 1{,}04098\, m^2}$$

$$\mathrm{v}=\frac{0{,}1\ \mathrm{m^3/s}}{1{,}04098\ \ \mathrm{m^2}}$$

$$\boxed{\mathrm{v} = 0{,}09606\ \mathrm{m/s}}$$

$$\mathrm{R}=\frac{8\sqrt{3}*(1{,}22286)^{\frac{3}{2}}}{6\sqrt{3}*\sqrt{1{,}22286}*(1+12(1{,}22286))^{\frac{1}{2}}+3*ln\left(2\sqrt{3}*\sqrt{1{,}22286}+(1+12(1{,}22286))^{\frac{1}{2}}\right)}$$

$$\boxed{\mathrm{R} = 0{,}34922\ \mathrm{m}}$$

Calculando R*V

$$\mathrm{R}*\mathrm{V}=0{,}34922*0{,}09606$$

$$\boxed{\mathrm{R}*\mathrm{V} = 0{,}03355 \approx 0{,}034}$$

Por lo que al obtener por segunda vez podemos asegurar que ya hemos encontrado el valor real de “n” para el canal parabólico con a = 3 en una condición “B”.

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com

Resultados:

$\mathbf{Q = 0,1\ {}^{m^3}/_{s}}$
$\mathbf{s = 0,003}$
$\mathbf{n = 0,29}$
$\mathbf{y = 1,22286\ m}$
$\mathbf{A = 1,04098\ m^2}$
$\mathbf{v = 0,09606\ m/s}$
$\mathbf{R = 0,34922\ m}$

Instituto Tecnológico de Costa Rica – Escuela de Ingeniería Agrícola
Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarriavae@gmail.com