



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN TUBERÍAS DE
POLIETILENO PARA SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO**

Migdalia Azucena del Cid

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN TUBERÍAS DE
POLIETILENO PARA SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MIGDALIA AZUCENA DEL CID

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN TUBERÍAS DE POLIETILENO PARA SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha noviembre de 2015.

Migdalia Azucena del Cid

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 11 de Septiembre de 2017

Ingeniero

Luis Manuel Sandoval Mendoza

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación de la estudiante Migdalia Azucena Del Cid, quien se identifica con Registro Académico 2007-14410 y CUI No. 2565 53114 0101, titulado **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN TUBERÍAS DE POLIETILENO PARA SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO**, y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496

Docente Departamento de Hidráulica



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala, 18 de septiembre de 2017

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Director Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **"CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN TUBERÍAS DE POLIETILENO PARA SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO"**, desarrollado por la estudiante de ingeniería civil Migdalia Azucena Del Cid, quien contó con la asesoría del ingeniero Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Jefe del Departamento de Hidráulica



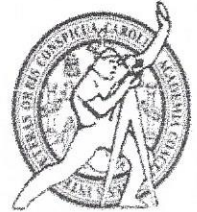
Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua




USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA


<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación de la estudiante Migdalia Azucena del Cid **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN TUBERÍAS DE POLIETILENO PARA SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2017

/mrm.

Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua

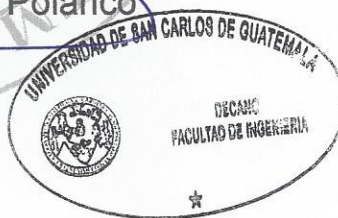




El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN TUBERÍAS DE POLIETILENO PARA SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO**, presentado por la estudiante universitaria: **Migdalia Azucena del Cid**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2017

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por bendecir e iluminar mi vida, y por permitirme cumplir uno de mis sueños.
- Mi mamá** Victoria del Cid Zuleta, por darme la vida, por su dedicación, por su amor incondicional y por apoyarme en cada una de las decisiones que he tomado.
- Mis hermanos** Kevin Joel Antonio y Wilson Odhair del Cid por ser parte importante de mi vida y demostrarme que siempre puedo contar con ellos.
- Mis tíos y demás familia** María del Rosario, José Antonio, Bernabé Armando, Clara Luz, Irma y Ana María del Cid (q. e. p. d.), por su apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la casa de estudio donde he obtenido mis conocimientos técnicos y teóricos en el marco de la ingeniería civil y donde también aprendí lecciones de vida.

Facultad de Ingeniería

Por haberme brindado mi formación profesional y ser mi segundo hogar.

**Mis amigos de la
Facultad**

Alba García, Obed Contreras, Ricardo Contreras, Melvin Zabala, Leonel Morán, Marvin Lorente, Nery Moreno, Ana Lucía Blanco y demás amigos por haber compartido buenos y malos momentos los cuales siempre estarán en mi corazón.

Ingeniero Luis Sandoval

Por sus enseñanzas, ideas y conocimientos compartidos durante la elaboración del presente trabajo, pero aún más por su amistad y apoyo.

**Ingeniero Carlos
Gordillo**

Por compartir sus conocimientos y experiencia en el desarrollo del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. HIDRODINÁMICA	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Tipos de corriente	1
1.3. Número de Reynolds.....	2
1.4. Tipos de flujo	3
1.4.1. Flujo laminar	3
1.4.2. Flujo turbulento	3
1.4.3. Flujo en transición.....	4
1.5. Radio hidráulico.....	4
1.6. Rugosidad interna de las tuberías	5
1.7. Ecuación de continuidad.....	6
1.8. Ecuación de la energía en una corriente líquida.....	7
1.9. Cambios de energía	8
1.9.1. Cambio de energía de presión en energía potencial	8
1.9.2. Cambio de energía cinética en energía de presión.....	9
1.9.3. Energía cinética a energía potencial.....	9

1.10.	Generalización de la ecuación de Bernoulli a líquidos reales, pérdidas de carga.....	10
2.	CONDUCCIONES.....	11
2.1.	Conducciones a presión.....	11
2.2.	Presiones	15
2.2.1.	Presión de prueba en fábrica	15
2.2.2.	Presión máxima de trabajo.....	16
2.2.3.	Presión de rotura.....	16
2.3.	Tipos de tubería	16
2.4.	Tubería de policloruro de vinilo	16
2.5.	Tubería de polietileno.....	17
2.5.1.	Polietileno de baja densidad (LDPE).....	18
2.5.2.	Polietileno de alta densidad (HDPE)	19
3.	ECUACIONES EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DE TUBERÍAS.....	23
3.1.	Flujo turbulento en tubería lisa	23
3.1.1.	Ecuación de Blasius	23
3.1.2.	Ecuación de Cruciani-Margaritora	24
3.2.	Flujo turbulento en zona de transición.....	25
3.2.1.	Ecuación de Colebrook-White	25
3.2.2.	Ecuación de Hazen-Williams.....	26
3.2.3.	Ecuación de Scobey.....	27
3.2.4.	Ecuación de Veronese-Datei.....	28
3.3.	Flujo turbulento rugoso.....	29
3.3.1.	Ecuación de Manning.....	29
3.4.	Otras ecuaciones prácticas	30
3.4.1.	Ecuación de Darcy	30
3.4.2.	Ecuación de Scimeni.....	31

4.	DISPOSITIVO DE ENSAYO.....	33
4.1.	Descripción del dispositivo	33
4.2.	Procedimiento experimental	38
4.2.1.	Método de aforo.....	39
4.2.2.	Datos obtenidos.....	40
4.2.3.	Cálculos y gráficas.....	42
4.2.3.1.	Resultados de tubería de 1/2"	42
4.2.3.2.	Resultados de tubería de 3/4"	50
4.2.3.3.	Resultados de tubería de 1"	58
4.2.4.	Discusión de resultados.....	67
	CONCLUSIONES	77
	RECOMENDACIONES.....	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cambio de energía de presión en energía potencial.....	8
2.	Cambio de energía cinética en energía de presión.....	9
3.	Cambio de energía cinética en energía potencial	10
4.	Pérdida de energía en flujo real	10
5.	Tubería	11
6.	Piezas especiales	12
7.	Válvula de compuerta.....	12
8.	Válvula de retención.....	13
9.	Ventosa	13
10.	Válvula de seguridad.....	14
11.	Juntas.....	14
12.	Red de distribución.....	15
13.	Corte se sección de tuberías.....	34
14.	Trazo de áreas de secciones de tuberías	34
15.	Área de las secciones de tuberías	35
16.	Esquema de dispositivo	36
17.	Dispositivo de aforo.....	36
18.	Elaboración de dispositivo de aforo.....	37
19.	Instalación de tuberías en dispositivo de aforo	37
20.	Banco hidráulico para realizar aforos	38
21.	Realizacion de aforo.....	39
22.	Factor de pérdida diámetro ½" longitud 1m.....	43
23.	Factor de pérdida diámetro ½" longitud 3m.....	44

24.	Comparación de pérdida de energía diámetro ½" longitud 3m	45
25.	Comparación "hf", Cruciani Margaritora diámetro ½" longitud 3m	46
26.	Comparación "hf" Hazen-Williams, diámetro ½" longitud 3m	46
27.	Comparación de "hf" Scobey, diámetro ½" longitud 3m	47
28.	Comparación de "hf" Varonese-Datei, diámetro ½" longitud 3m	47
29.	Comparación de "hf" Manning, diámetro ½" longitud 3m	48
30.	Comparación de "hf" Darcy, diámetro de ½" longitud 3m	48
31.	Ajuste de pérdida de energía (k*hf teórica) diámetro ½" longitud 3m ...	50
32.	Factor de pérdida diámetro de ¾" longitud 1m	52
33.	Factor de pérdida diámetro ¾" longitud 3m	52
34.	Comparación de pérdida de energía diámetro ¾" longitud 3m	54
35.	Comparación de "hf" Cruciani Margaritora, diámetro ¾" longitud 3m ...	54
36.	Comparación "hf" Hazen-Williams, diámetro ¾" longitud 3m	55
37.	Comparación de "hf" Scobey, diámetro ¾" longitud 3m	55
38.	Comparación de hf" Varonese-Datei, diámetro ¾" longitud 3m	56
39.	Comparación de "hf" Manning, diámetro ¾" longitud 3m	56
40.	Comparación de "hf" Darcy, diámetro ¾" longitud 3m	57
41.	Ajuste de pérdida de energía (k*hf teórica) diámetro ¾" longitud 3m ...	58
42.	Factor de pérdida diámetro de 1" longitud 1m	60
43.	Factor de pérdida diámetro de 1" longitud 3m	60
44.	Comparación de pérdida de energía diámetro 1" longitud 3m	62
45.	Comparación de "hf" Cruciani Margaritora, diámetro 1" longitud 3m	62
46.	Comparación hf" Hazen-Williams, diámetro 1" longitud 3m	63
47.	Comparación de "hf" Scobey, diámetro de 1" longitud 3m	63
48.	Comparación de "hf" Varonese-Datei, diámetro 1" longitud 3m	64
49.	Comparación de "hf" Manning, diámetro 1" longitud 3m	64
50.	Comparación de "hf" Darcy, diámetro 1" longitud 3m	65
51.	Ajuste de pérdida de energía (k*hf teórica) diámetro 1" longitud 3m	66
52.	Relación "K" y diámetro Cruciani-Margaritora	67

53.	Relación “K” y diámetro Hazen-Williams	68
54.	Relación “K” y diámetro Scobey	68
55.	Relación “K” y diámetro Varonnesse-Datei	69
56.	Relación “K” y diámetro Manning	69
57.	Relación “K” y diámetro Darcy	70
58.	Relación “K” y diámetro experimental (mm)	71
59.	Relación “K” y diámetro experimental (cm)	71
60.	Comparación modelo no lineal diámetro 1/2”	73
61.	Comparación modelo no lineal diámetro de 3/4”	74
62.	Comparación modelo no lineal diámetro 1”	74

TABLAS

I.	Rugosidad absoluta de materiales	5
II.	Características del polietileno de baja densidad	18
III.	Características del polietileno de alta densidad	20
IV.	Valores de la constante C de la ecuación de Hazen-Williams	27
V.	Valores de la constante K de la ecuación de Scobey	28
VI.	Rugosidad de Manning para materiales.....	30
VII.	Peso de sección de tuberías	35
VIII.	Tubería de 1/2”	40
IX.	Tubería de 3/4”	41
X.	Tubería de 1”	41
XI.	Resultados diámetro de 1/2”	43
XII.	Factor de fricción diámetro de 1/2”	44
XIII.	Perdida de energía de ecuaciones empíricas.	45
XIV.	Resultados diámetro de 3/4”	51
XV.	Factor de fricción diámetro de 3/4”	53
XVI.	Perdida de energía de ecuaciones empíricas	53

XVII.	Resultados diámetro de 1"	59
XVIII.	Factor de fricción diámetro de 1"	61
XIX.	Perdida de energía de ecuaciones empíricas	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal
D_e	Diámetro exterior
D	Diámetro interno
e	Espesor de pared
f	Factor de fricción
L	Longitud de la tubería
Re	Número de Reynolds
h_f	Pérdida
h_c	Pérdida de carga continua
J	Perdida de carga en la tubería
P_m	Perímetro mojado
P	Presión nominal
R	Radio hidráulico
ϵ	Rugosidad absoluta
A	Sección transversal
σ	Tensión de trabajo admisible
V	Velocidad media

GLOSARIO

Aforo	Medida de la cantidad de fluido que lleva una corriente en una unidad de tiempo.
Carga	Medida específica de la presión del líquido, expresada en unidades de longitud.
Conducción	Manera de dirigir, llevar o guiar un fluido.
Corriente	Movimiento de un fluido o flujo.
Eficiencia	Relación entre la salida y entrada de energía.
Estrangulación	Cuando un fluido se expande desde una región de alta presión hasta otra de baja presión.
Presión	Magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie.
Rugosidad	Irregularidades que posee una superficie.
Sección	Forma geométrica de un conducto.
Volumen	Medidas del espacio de tres dimensiones ocupado por un cuerpo.

RESUMEN

Esta investigación presenta las características y el comportamiento hidráulico de tuberías de sistemas de riego por goteo, de las cuales se tiene poca información en cuanto a las pérdidas que experimenta el flujo al circular en ellas.

Se realizó una investigación bibliográfica sobre el tema en las distintas fuentes (libros, tesis y todo tipo de literatura, físico y digital) relacionada con el tema. En el laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica se montó un banco especial para realizar los ensayos en tuberías rectilíneas de polietileno para riego por goteo. Obteniendo diferentes valores de carga para distintos valores de caudal y se ensayó con diámetros de tuberías comercialmente disponibles. Se analizaron los resultados obtenidos en los ensayos con ecuaciones de diámetro pequeño y se deducen coeficientes de descarga para corregir ecuaciones como la de Darcy-Weisbach, Scobey y Veronese-Datei, entre otras.

También se dedujo mediante el uso del programa SPSS una ecuación para modelar la ecuación general que incluya las variables que intervienen para la obtención de la pérdida de energía por fricción en tuberías.

OBJETIVOS

General

Determinar y analizar experimentalmente el comportamiento de la pérdida de energía por fricción en tuberías de polietileno.

Específicos

1. Explicar la variación de la pérdida de energía por fricción según el caudal y el diámetro.
2. Comparar los resultados experimentales con los resultados de las ecuaciones ya establecidas para la pérdida por fricción que puedan ser aplicadas para tuberías de polietileno.
3. Obtener ecuaciones experimentales por medio de métodos estadísticos y numéricos con los datos obtenidos con los ensayos en laboratorio, que relaciones la pérdida de carga de una tubería de polietileno.

INTRODUCCIÓN

El diseño hidráulico en un sistema de riego consiste en el adecuado funcionamiento y sincronización de un conjunto de tuberías y accesorios que permiten el transporte de un volumen de agua desde una fuente hasta el área destinada, disminuyendo el desperdicio de agua y aumentando la eficiencia de conducción, distribución y aplicación en todo el sistema.

Entendiendo el proceso de conducción y la aplicación de la hidráulica en estos sistemas, se sabe que la pérdida de carga en una tubería representa la energía perdida del flujo debido a la fricción entre sí mismo y contra las paredes de la tubería que lo contiene. Estas pérdidas se conocen como caídas de presión, que también pueden ser producidas por estrangulación o cambios de dirección del fluido al pasar por un accesorio. En la investigación se propone evaluar el comportamiento de la pérdida por fricción debido a la circulación del flujo en tuberías de polietileno.

1. HIDRODINÁMICA

Parte de la dinámica referente a las causas que originan el desplazamiento de la materia en estado líquido.

1.1. Generalidades

Estudia el movimiento o flujo de los fluidos. En el movimiento de líquidos, las velocidades son distintas tanto en magnitud como en dirección en toda masa líquida; es preciso su conocimiento para definir el movimiento.

Toda partícula líquida en movimiento, posee una velocidad v , que es función de su posición y del tiempo, es decir:

$$v = v(x, y, z, t)$$

1.2. Tipos de corriente

Las corrientes pueden ser de dos tipos: corrientes forzadas en carga y corrientes con lámina libre.

Se denominan corrientes forzadas, aquellas cuyo contorno está totalmente limitado por la conducción o tubería. Es el caso de las tuberías que funcionan a sección llena.

Se llaman corrientes con lámina libre, al caso de canales o acequias de riego, aquellas que tienen parte de su sección transversal (superficie libre) en contacto con la atmósfera.

1.3. Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional relacionado con las características del flujo, que influye notablemente en el valor de las pérdidas de carga, empleándose en ocasiones también para delimitar el campo de validez de las distintas expresiones de la ecuación de pérdidas más utilizadas.

Se define como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas (fuerzas de fricción) en el interior de una corriente.

Las fuerzas de inercia que actúan sobre un volumen L^3 , según la ley de Newton ($F = m \cdot a$) son proporcionales a:

$$QL^3 \frac{V}{T} = QL^2 V^2$$

Siendo $Q = \text{densidad del líquido}$

Las fuerzas de fricción, $\tau \cdot S$, que actúan sobre una superficie L^2 , son proporcionales a:

$$\mu \frac{dv}{dy} S = \mu \frac{V}{L} L^2 = \mu L V^2$$

en donde, $\mu = \text{viscosidad absoluta del líquido}$ y $\tau = \text{esfuerzo tangencial (tensión de adherencia o de rozamiento)}$.

Por tanto:

$$Re = \frac{Q L^2 V^2}{\mu L V} = \frac{Q L V}{\mu} = \frac{L V}{\nu}$$

En el caso de tuberías a presión, la longitud característica es el diámetro de la conducción, D, por lo que:

$$Re = \frac{V D}{\nu}$$

Siendo:

V= velocidad media circulante del agua (m/s.)

D= diámetro interior de la tubería (m.)

ν = viscosidad cinemática del agua (m²/s.)

1.4. Tipos de flujo

El comportamiento de los líquidos en una tubería puede presentar 3 tipos de flujo: laminar, transición y turbulento.

1.4.1. Flujo laminar

En el flujo laminar o viscoso las partículas del líquido se mueven a lo largo de una trayectoria uniforme en capas o láminas, deslizándose una capa sobre las adyacentes. En este régimen se cumple la ley de Newton de la viscosidad y la acción de esta frena la tendencia a la turbulencia.

1.4.2. Flujo turbulento

En el régimen turbulento o hidráulico, que es el más frecuente en ingeniería, las partículas de fluido se mueven siguiendo trayectorias erráticas, desordenadas, muy variables, con formación de torbellinos. No es posible un estudio matemáticamente riguroso de este flujo, por lo que hay que recurrir a procedimientos experimentales.

1.4.3. Flujo en transición

En el régimen de transición la velocidad aumenta o disminuye pasando de un régimen laminar a uno turbulento o viceversa.

1.5. Radio hidráulico

Para secciones transversales de conductos, no circulares, no es posible utilizar el diámetro, D , como dimensión característica en el número de Reynolds, en estos casos, en su lugar se emplea el radio hidráulico definido por:

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

Donde:

R = radio hidráulico

A = sección transversal por la que circula el líquido

Pm = perímetro mojado (sin incluir la superficie libre, si la hubiese)

En el supuesto de conducción circular a sección llena, el radio hidráulico valdría:

$$R = \frac{A}{Pm} = \frac{\pi \frac{D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

1.6. Rugosidad interna de las tuberías

Las rugosidades de las paredes de las tuberías comerciales son, comúnmente, muy heterogéneas y presentan irregularidades de diferentes formas y tamaños que se distribuyen de muy diversas maneras sobre la superficie interior de dichas paredes.

Las dimensiones que definen estas rugosidades son, por lo tanto, difíciles de determinar.

Para dichas desigualdades o irregularidades de diferentes alturas que presentan las superficies internas de los tubos se adopta un valor promedio que se llama rugosidad absoluta (ϵ), el cual se mide generalmente en metros (m) o en milímetros (mm).

La rugosidad relativa, se define como el cociente entre la rugosidad absoluta (ϵ) y el diámetro de la tubería (D).

Tabla I. **Rugosidad absoluta de materiales**

Material	Estado de conservación	ϵ (mm.)
Vidrio, cobre, latón plomo, bronce, aluminio estirado, araldite.	Nuevo	0-0,015
Polietileno	Nuevo	0,002-0,007
PVC	Nuevo	0,007-0,02
Fibrocemento	Nuevo	0,0125-0,025
Acero estirado	Nuevo	0,03-0,06

Fuente: MARTINEZ, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada y Proyectos de Riego*. p. 31.

1.7. Ecuación de continuidad

En un flujo permanente, la masa de fluido que atraviesa cualquier sección transversal es constante, aun cuando haya variación en su sección transversal. Dado que la masa de un fluido que atraviesa una sección transversal por unidad de tiempo se expresa como ρvA , se tiene que la ecuación de continuidad para cualquier fluido es:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

Como la densidad puede variar con el tiempo dependiendo de las condiciones de presión y temperatura del fluido, sin embargo, para un fluido incompresible $\rho_1 = \rho_2$, de esta forma, para un líquido el cual es considerado incompresible la ecuación de continuidad es:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Puesto que $Q = Av$, se tiene

$$Q_1 = Q_2$$

Esta ecuación establece que, para un flujo estable, la rapidez de flujo de volumen es la misma en cualquier sección.

1.8. Ecuación de la energía en una corriente líquida

La ecuación de energía se conoce también con el nombre de ecuación de Bernoulli.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = cte$$

Dicha ecuación, es una expresión particular del principio de conservación de la energía, pues representa la invarianza, a lo largo de una trayectoria, de la energía de la unidad de peso (energía específica).

Cada término de la ecuación de Bernoulli es el resultado de dividir una expresión de la energía entre el peso de un elemento del fluido.

El elemento de fluido tendrá las siguientes formas de energía:

- Energía Potencial: debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto a algún nivel de referencia.
- Energía Cinética: debido a su velocidad, la energía cinética del elemento está dada por $V^2/2g$.
- Energía de Flujo: conocida como energía de presión o trabajo de flujo, esta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión.

La energía específica tiene dimensión lineal, por lo que los términos de la ecuación de Bernoulli también se llaman alturas; altura geométrica o de posición, z ; altura de presión, P/γ y altura de velocidad $V^2/2g$.

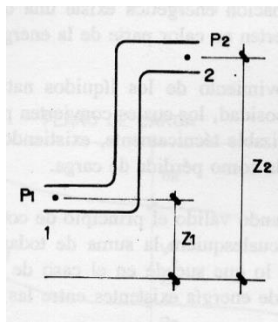
1.9. Cambios de energía

La ecuación general de Bernoulli permite que los tres términos experimenten intercambios unos con otros manteniendo constante la energía total a lo largo del flujo.

1.9.1. Cambio de energía de presión en energía potencial

Con este tipo de conversión el caudal y el diámetro de la tubería son constantes, por lo que la velocidad media del flujo también es constante. La expresión de la transformación se ilustra a continuación.

Figura 1. Cambio de energía de presión en energía potencial



Fuente: MARTINEZ, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada a Proyectos de Riego*. p. 35.

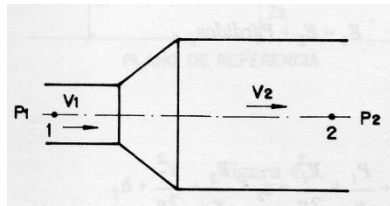
$$V = cte.$$

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma}$$

1.9.2. Cambio de energía cinética en energía de presión

Con este tipo de conversión el nivel de referencia de la altura en dirección de la gravedad permanece constante a lo largo de la tubería, por lo que la velocidad media del flujo resulta constante. La expresión de la transformación se ilustra a continuación.

Figura 2. Cambio de energía cinética en energía de presión



Fuente: MARTINEZ, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada a Proyectos de Riego*. p. 35.

$$z = cte.$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

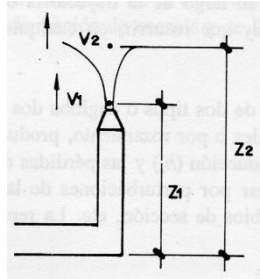
1.9.3. Energía cinética a energía potencial

Con este tipo de conversión se analiza la cantidad de movimiento fuera de la tubería haciendo que la presión mínima sea relativamente igual a la presión normal.

$$p = p_{min} = cte.$$

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Figura 3. **Cambio de energía cinética en energía potencial**

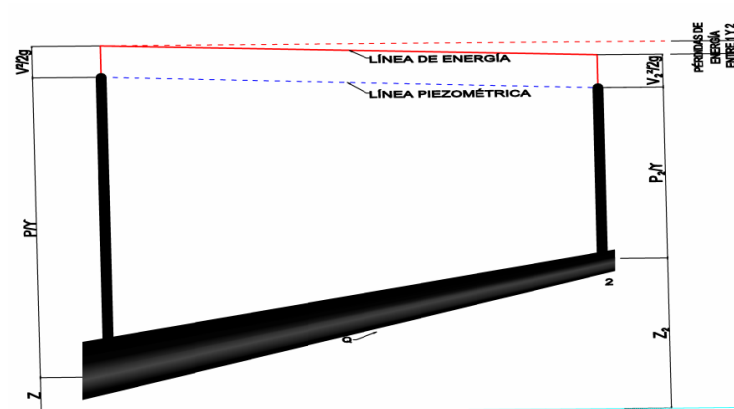


Fuente: MARTINEZ, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada a Proyectos de Riego*. p. 35.

1.10. Generalización de la ecuación de Bernoulli a líquidos reales, pérdidas de carga

Toda partícula que se desplaza sufre pérdidas de energía debido al rozamiento con la superficie con la que está en contacto, es por ello que la adecuación de la ecuación de energía se complementa como se muestra a continuación:

Figura 4. **Pérdida de energía en flujo real**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

2. CONDUCCIONES

2.1. Conducciones a presión

También denominadas tuberías forzadas, tiene como objeto funcionar a sección llena y en los que el movimiento del líquido se debe a la presión existente en su interior, pudiendo presentar, por tanto, pendientes y contrapendientes.

Antes del estudio de las corrientes líquidas en tuberías, se rectificarán los siguientes conceptos.

- Tubería: elemento de sección circular y piezas especiales, formando un conducto cerrado. Cuando la tubería no tiene ramificaciones y tiene un diámetro constante se le denomina tubería simple.

Figura 5. Tubería



Fuente: <http://www.novedades-agricolas.com/es/riego/materiales-de-riego/tubos-de-riego>.

Consulta: septiembre de 2017.

- Piezas especiales: unidades que permiten empalmes, derivaciones de sección, entre otros.

Figura 6. **Piezas especiales**



Fuente: http://adequa.es/category_page/sistema-de-evacuacion/. Consulta: septiembre de 2017.

- Válvula de compuerta: también llamada válvula de regulación; son dispositivos empleados para controlar la corriente de un fluido. Consiste en una compuerta, con forma de cuña que se mueve en sentido perpendicular al eje de la tubería, que se cierra al hacer descender dicha compuerta.

Figura 7. **Válvula de compuerta**



Fuente: <http://www.fundicionpacifico.com/ferreteria/valvulas-compuerta/valvulas-de-compuertas.html>. Consulta: septiembre de 2017.

- Válvulas de retención: dispositivo que consiste en una compuerta giratoria, cuya apertura se produce al paso del líquido y su cierre es por gravedad, impidiendo su retroceso. También llamada válvula antirretorno.

Figura 8. **Válvula de retención**



Fuente: <http://www.boteli.com/es/productshow/163-v%C3%A1lvula-de-retenci%C3%B3n-a-clapeta-api-6d-bs1868.html>. Consulta: septiembre de 2017.

- Ventosas: elementos que permiten la salida o entrada automática del aire en las tuberías, en función del equilibrio entre la presión interior y la presión atmosférica.

Figura 9. **Ventosa**



Fuente: <http://www.turiego.es/valvulas-reductores-presion/ventosas-cineticas-doble-efecto-trifuncionales-dinamicas-automaticas-cierre-lento.html>. Consulta: septiembre de 2017.

- Válvulas de seguridad: válvula que permite liberar la presión cuando sobrepasa los límites específicos hasta que descienda de nuevo a su nivel de seguridad.

Figura 10. **Válvula de seguridad**



Fuente: <http://www.bvalve.es/productos/valvulas-de-seguridad/>. Consulta: septiembre de 2017.

- Juntas: unidades que se utilizan para unir tubos y piezas especiales.

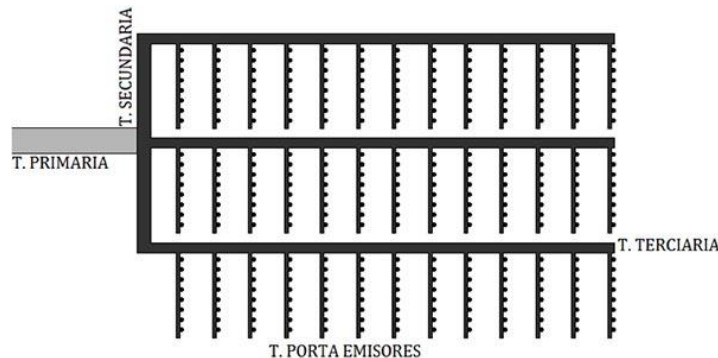
Figura 11. **Juntas**



Fuente: https://www.alibaba.com/product-detail/Plastic-Bend-30-Degree-Elbow-HDPE_60502136354.html. Consulta: septiembre de 2017.

- Red de distribución: conjunto de tuberías, principal, secundarias y terciarias, entre otros.

Figura 12. Red de distribución



Fuente: <http://www.novedades-agricolas.com/es/riego/materiales-de-riego/tubos-de-riego>.

Consulta: septiembre de 2017.

2.2. Presiones

Las presiones que deben conocerse de una tubería son al menos de tres tipos: prueba de fábrica, máxima de trabajo y de rotura. Para la obtención de una tubería que cumpla con características esenciales en la aplicación de proyectos de obra civil. Es necesario someter a estándares de calidad nacionales o extranjeros para contar con una aproximación en el futuro comportamiento de los elementos utilizados.

2.2.1. Presión de prueba en fábrica

Es aquella presión sobre la que se timbran y clasifican los tubos comerciales, que habrán de superar en fábrica sin romperse y acusar falta de estanqueidad.

2.2.2. Presión máxima de trabajo

Máxima presión a la que se recomienda que trabaje la tubería, ya que es la máxima presión interna a la que puede estar sometido un tubo en servicio a la temperatura de utilización, siendo dinámica o transitoria (golpe de ariete).

2.2.3. Presión de rotura

Es aquella a la cual se rompe la tubería, es decir que la presión en el interior del tubo produce una tracción circunferencial igual a la carga nominal de rotura a tracción del material que lo constituye.

2.3. Tipos de tubería

Para la mayoría de sistemas de conducción de agua se utilizan materiales como policloruro de vinilo (PVC) y polietileno (PE). Esta última puede dividirse de acuerdo a su proceso y calidad de fabricación en alta o baja densidad.

2.4. Tubería de policloruro de vinilo

Se fabrican a partir de las resinas de PVC, estabilizantes, lubricantes y colorantes, debiendo estar exentas de plastificantes.

Los procesos industriales para la fabricación de la resina (polímero) de PVC son:

- Polimerización en emulsión
- Polimerización en suspensión
- Polimerización en masa

El proceso de fabricación de los tubos es por extrusión. La materia prima calentada a una temperatura aproximada de 140 °C, se hace avanzar en estado pastoso mediante un tornillo sin fin, fluyendo por una boquilla adoptado la forma de tubo, finalmente se enfría y se corta a la medida deseada.

Según las condiciones (presión, temperatura, aditivos, entre otros) y el proceso de fabricación se obtienen polímeros de PVC de cadenas más o menos largas.

Las resinas de PVC se definen por una serie de parámetros: densidad aparente, granulometría, contenido de volátiles, cenizas y especialmente, por el índice de viscosidad y el valor K (que expresan la longitud de las cadenas, por consiguiente, el peso molecular del polímero).

El valor de K de una resina se obtiene de forma experimental, contrastando las viscosidades de una disolución del polímero y del disolvente puro.

2.5. Tubería de polietileno

El polietileno se obtiene por polimeración del etileno. Según sea la presión y temperatura del proceso, se obtiene un tipo de polietileno.

Según el proceso de fabricación varía la cristalinidad, correspondiendo al polietileno de baja densidad o de alta densidad.

2.5.1. Polietileno de baja densidad (LDPE)

Los diámetros exteriores de esta tubería están normalizados y expresados en mm, los espesores de pared se calculan por la siguiente ecuación:

$$e = \frac{PD_e}{2\sigma + P}$$

Donde:

P , presión nominal

D_e diámetro exterior en mm.

σ tensión de trabajo admisible,

e es el espesor de pared, en mm.

Tabla II. **Características del polietileno de baja densidad**

Diámetros exteriores (mm)	Presión nominal (kg/cm ²)		
	4 e (mm)	6 e (mm)	10 e (mm)
16	-	2.0	2.2
20	-	2.0	2.8
25	2	2.3	3.5
32	2	2.9	4.4
40	2.4	3.7	5.5
50	3.0	4.6	6.9
63	3.8	5.8	8.6
75	4.5	6.8	10.3
90	5.4	8.2	12.3
110	6.6	10.0	15.1
125	7.4	11.4	17.1
140	8.3	12.7	19.2
160	9.5	14.6	21.9
180	10.7	16.4	24.6
200	11.9	18.2	25.3
225	13.4	20.5	-
250	14.8	22.7	-
315	18.7	28.6	-
400	23.7	-	-

Fuente: MAYOL, José. *Tuberías Tomo 1*. p. 54.

Las presiones de trabajo admisibles son iguales a las nominales cuando se conduce agua a 20 °C; si el fluido es diferente deben hacerse las correcciones pertinentes.

Las ecuaciones de tolerancia en el diámetro exterior y en el espesor de pared son:

Tolerancia en el diámetro exterior

$$Tolerancia = 0,009 D \text{ (mm)}$$

Tolerancia en el espesor de pared

$$Tolerancia = 0,1 e + 0,2 \text{ (mm)}$$

Para diámetros inferiores a 400 mm.

$$Tolerancia = 0,15e + 0,2 \text{ (mm)}$$

Para D =400 mm y superiores.

2.5.2. Polietileno de alta densidad (HDPE)

Diámetros exteriores, expresados en mm.

Los espesores se calculan por la ecuación indicada anteriormente.

$$e = \frac{PD_e}{2\sigma + P}$$

Donde:

P , presión nominal

D_e diámetro exterior en mm.

σ es la tensión de trabajo admisible que vale 50 kg/cm².

e es el espesor de pared, en mm.

Tabla III. **Características del polietileno de alta densidad**

Diámetros exteriores (mm)	Presión nominal (kg/cm ²)		
	4 e (mm)	6 e (mm)	10 e (mm)
16	-	-	2.0
20	-	-	2.0
25	-	2.0	2.3
32	-	2.0	2.9
40	2.0	2.3	3.6
50	2.0	2.8	4.5
63	2.4	3.6	5.7
75	2.8	4.3	6.8
90	3.5	5.1	8.2
110	4.2	6,2	10.0
125	4.8	7.1	11.4
140	5.4	7.9	12.7
160	6.2	9.1	14.6
180	6.9	10.2	16.4
200	7.7	11.4	18.2
225	8.7	12.8	20.5
250	9.6	14.2	22.8
315	12.1	17.9	28.7
400	15.4	22.7	36.4

Fuente: MAYOL, José. *Tuberías Tomo 1*.p. 56.

La presión de trabajo coincide con la nominal cuando se conduce agua a 20° C; para otros líquidos y temperatura deben tenerse en cuenta las posibles limitaciones de uso.

Tolerancia en el diámetro exterior. Viene expresada por la ecuación:

$$Tolerancia = 0,009 D_e (mm)$$

con un valor mínimo de 0,3 mm. y siendo D_e el diámetro exterior en mm.

Tolerancia en el espesor de pared. Determinada por la siguiente ecuación:

$$Tolerancia = 0,1 e + 0,2 (mm)$$

Siendo e el espesor de pared en mm.

3. ECUACIONES EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DE TUBERÍAS

3.1. Flujo turbulento en tubería lisa

Por el efecto de rozamiento entre las partículas del fluido y las paredes de la tubería es necesario segmentar los valores de pérdida de carga por la poca turbulencia obtenida en una superficie lisa algunas de las ecuaciones utilizadas son: Blasius y Cruciani-Margaritora.

3.1.1. Ecuación de Blasius

Blasius en 1911 propone una ecuación en la que el factor de fricción viene dado solo como una función del número de Reynolds. Dicha expresión es válida para tubos lisos en los que la rugosidad relativa (relación entre el diámetro y la rugosidad media del tubo) no afecta al flujo y a las irregularidades de la tubería al tapar la subcapa laminar.

La ecuación puede expresarse de la siguiente manera:

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$$

Donde:

f= factor de fricción en tuberías lisas

Re= número de Reynolds

La cual al sustituirse en la ecuación general de pérdida de carga de Darcy-Weisbach y colocando la velocidad media en función del caudal.

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Donde:

V= velocidad media

Q= caudal

D= diámetro interno

Lo que da lugar a:

$$h_c = \frac{0,0246v^{0,25}}{D^{4,75}} lQ^{1,75}$$

Donde:

h_c = pérdida de carga continua

D= diámetro interno

L=longitud de la tubería

Q=caudal

3.1.2. Ecuación de Cruciani-Margaritora

$$hf = \frac{0,00099}{D^{4,75}} Q^{1,75} L$$

Donde:

hf= pérdida de carga en la tubería

D= diámetro interior

Q=caudal

L= longitud de la tubería

Esta especialmente recomendada para tuberías de polietileno (PE)

3.2. Flujo turbulento en zona de transición

Existe una pequeña sección llamada transición en la que es difícil establecer el punto de frontera que fragmenta el flujo turbulento-transición o transición-laminar, debido al cambio de rugosidad o velocidades a lo largo de una tubería. Es en estos casos donde se origina la aplicación de la ecuación de Colebrook-White y Hazen-Williams.

3.2.1. Ecuación de Colebrook-White

Colebrook y White, formularon una ecuación que representa todos los grupos de flujo turbulento en el diagrama de $f - Re$, combinando las leyes de la tubería lisa.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \frac{2,51}{Re \sqrt{f}}$$

Y de la tubería rugosa

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \frac{\epsilon}{3,71 D}$$

Quedando:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\epsilon}{3,71 D} \right)$$

Donde:

f = coeficiente de fricción (adimensional)

Re = número de Reynolds (adimensional)

ϵ = rugosidad absoluta, en mm

D = diámetro interior, en mm

La resolución de la ecuación se facilita utilizando el diagrama de Moody, que permite determinar fácilmente el valor de f con bastante exactitud.

3.2.2. Ecuación de Hazen-Williams

Su aplicación se limita al flujo de agua en tuberías con diámetros mayores a 20 in y menores a 6 in. La velocidad no debe exceder 10ft/s

El factor de fricción, f , vale:

$$f = \frac{13,68 g}{C^{1,85} V^{0,15} D^{0,17}}$$

Que puesta en función del caudal queda:

$$h_c = \frac{10,7}{C^{1,85} D^{4,78}} l Q^{1,85}$$

Donde:

h_c =pérdida de carga (m)

Q= caudal (m³/s)

C= coeficiente de rugosidad (adimensional)

D= diámetro interno de la tubería (m)

L= longitud de la tubería (m)

Esta fórmula puede emplearse para $Re > 4\ 000$ y $Re < 60$ o bien en la zona de transición.

Tabla IV. **Valores de la constante C de la ecuación de Hazen-Williams**

Material tubería	Valores C
Fundición usada	85
Fundición nueva	100
Acero Usado	110
Acero Nuevo	120
Hormigón armado	128
Hierro	130
Fibro cemento	140
Plástico	150

Fuente: MARTINEZ, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada y Proyectos de Riego*. p. 77.

3.2.3. Ecuación de Scobey

En el cálculo de tuberías en riegos por aspersión hay que tener en cuenta que la fórmula incluye también las pérdidas accidentales o singulares que se producen por acoples y derivaciones propias de los ramales, es decir, proporciona las pérdidas de carga totales. La ecuación es la siguiente:

$$h_c = 4,094 \cdot 10^3 k \frac{Q^{1,9}}{D^{4,9}} l$$

Donde:

h_c =pérdida de carga

k= coeficiente de rugosidad

Q= caudal (m³/s)

D= diámetro interno de la tubería (m)

l= longitud de la tubería (m)

Tabla V. **Valores de la constante K de la ecuación de Scobey**

Valores de K	Material tubería
0.32	Fibrocemento. PVC. Aluminio con acoples cada 9m. y aspersores de Ø 4",5" y 6"
0.33	Aluminio con acoples cada 9m. y aspersores de Ø 3"
0.34	Aluminio con acoples de 9 m. y aspersores de Ø 2"
0.36	Acero soldado en tuberías de transporte
0.40	Aluminio con acoples en tubería de transporte
0.42	Acero galvanizado con acoples en tubería de transporte.

Fuente: MARTINEZ, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada y Proyectos de Riego*. p. 78.

La ecuación contempla las pérdidas de carga por acoples rápidos y derivaciones. En instalaciones de riego por aspersión, donde es muy utilizada la ecuación de Scobey, estas pérdidas se cifran del 20-25 % de las de rozamiento.

3.2.4. Ecuación de Veronese-Datei

Se emplea para tuberías de PVC y para $4 \times 10^4 < Re < 10^6$.

$$hf = \frac{0,000092}{D^{4,80}} Q^{1,80} L$$

Donde:

hf= pérdida de carga (m)

Q= caudal (m³/s)

D=diámetro interno de la tubería (m)

L= Longitud de la tubería

3.3. Flujo turbulento rugoso

Por el efecto de rozamiento entre las partículas del fluido y las paredes de la tubería es necesario segmentar los valores de pérdida de carga por la brusca turbulencia obtenida en una superficie rugosa, la ecuación más utilizada para este caso es la de Manning.

3.3.1. Ecuación de Manning

La fórmula de Manning se ha usado en canales, en tuberías la fórmula se usa para canal circular parcial y totalmente lleno. Uno de los inconvenientes de esta fórmula es que solo toma en cuenta un coeficiente de rugosidad obtenido empíricamente y no se toma en cuenta la variación de viscosidad por temperatura. Las variaciones del coeficiente por velocidad, sí las toma en cuenta, aunque el valor se considera para efectos de cálculo constante.

$$h_c = \frac{10,3n^2}{D^{5,33}} LQ^2$$

Donde:

h_c =pérdida de carga (m)

n = coeficiente de rugosidad (adimensional)

D = diámetro interno de la tubería (m)

Q = caudal (m³/s)

L = longitud de la tubería (m)

Tabla VI. **Rugosidad de Manning para materiales**

Valores n	Material tubería
0,006-0,007	PE
0,007-0,009	PVC
0,008-0,011	Acero
0,010-0,012	Fibro cemento
0,012-0,013	Fundición
0,013-0,015	Hormigón
0,016-0,018	Plástico corrugado

Fuente: MARTINEZ, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada y Proyectos de Riego*. p. 79.

Esta ecuación únicamente debe emplearse cuando $Re > 4,000$ y $Re > 40$

3.4. Otras ecuaciones prácticas

Para fines de investigación se incluyen algunas ecuaciones para determinar pérdidas de energía que son poco utilizadas por tener alguna restricción de aplicación, por ejemplo: Darcy, Scimeni, Dupuit, Maurice Levy, Flamant, Kutter, Bazin, Pouseuille, Von Karmann, Nikuradse, Hermann Burbach y Kozeny.

3.4.1. Ecuación de Darcy

La ecuación fue inicialmente una variante de la ecuación de Prony, desarrollada por el francés Henry Darcy. En 1845 fue refinada por Julius Weisbach, de Sajonia, hasta la forma en que se conoce actualmente.

La expresión general es:

$$h_c = f \frac{l V^2}{D 2g}$$

Donde:

h_c =pérdida de carga

f= coeficiente de fricción

l= longitud de la tubería

D= diámetro interno de la tubería (m)

v= velocidad media (m/s)

g= aceleración de la gravedad (m/s²)

Q= caudal (m³/s)

Teniendo en cuenta que $f = 4\lambda$ ($\lambda = \text{coeficiente de Fanning}$).

3.4.2. Ecuación de Scimemi

Se emplea en tuberías de fibrocemento con régimen turbulento y agua a presión. (recomendada para el dimensionado de tubos de fibrocemento)

$$V = 158R^{0.68}J^{0.56}$$

Donde:

R= radio hidráulico de la conducción en metros.

J= gradiente de pérdida de carga unitaria en la conducción.

V= velocidad media del flujo en el conducto en metros por segundo.

4. DISPOSITIVO DE ENSAYO

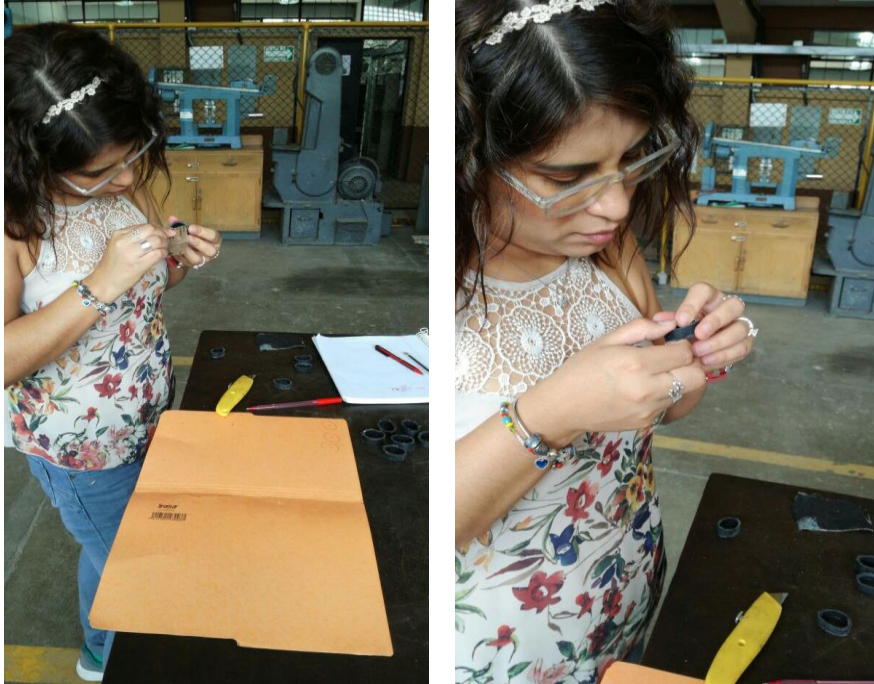
4.1. Descripción del dispositivo

Consiste en dos tuberías de PVC de 1 pulgada de diámetro que hacen circular una caudal constante a través de un banco hidráulico, un depósito de alimentación de agua y una bomba centrífuga. Un panel de piezómetros para el registro de la energía de presión y tres tuberías de ensayo de 1, 0,75 y 0,5 pulgadas de diámetro para evaluación de pérdida de energía por fricción.

Las tuberías de ensayo comprenden de tres conexiones para el registro de la energía de presión, la primera conexión marca el inicio de un tramo de un metro, la segunda el final del tramo de un metro y el inicio de un tramo de tres metros; la tercera corresponde al final del tramo de tres metros.

Las áreas de las tuberías de ensayo no obedecen a una geometría conocida, por lo que, marcar la huella del diámetro interno de la tubería sobre papel, cortar en los bordes y registrar el peso de la figura recortada, se obtiene una relación de área y peso. El valor del área resulta de recortar y registrar el peso de un trozo del mismo papel, pero, con el patrón de una figura cuadrada de un centímetro de lado.

Figura 13. Corte se sección de tuberías



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, edificio T-5.

Figura 14. Trazo de áreas de secciones de tuberías



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, edificio T-5.

Figura 15. Área de las secciones de tuberías



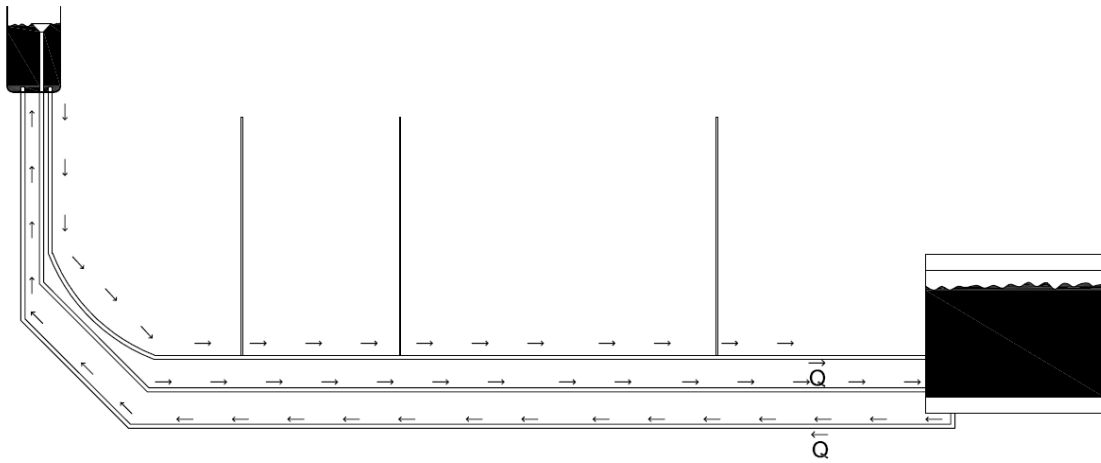
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, edificio T-5.

Tabla VII. **Peso de sección de tuberías recortadas**

Núm.	1 cm ²	Tubería de 1/2"	Tubería de 3/4"	Tubería de 1"
	gr	Gr	gr	gr
1	0,017	0,031	0,037	0,070
2	0,016	0,032	0,037	0,070
3	0,019	0,030	0,037	0,077
4	0,016	0,030	0,037	0,075
5	0,017	0,028	0,035	0,076
6	0,016	0,030	0,039	0,072
7	0,016	0,030	0,036	0,071
8	0,016	0,033	0,037	0,075
9	0,019	0,033	0,037	0,071
10	0,016	0,030	0,037	0,071
Promedio	0,168	0,307	0,369	0,728

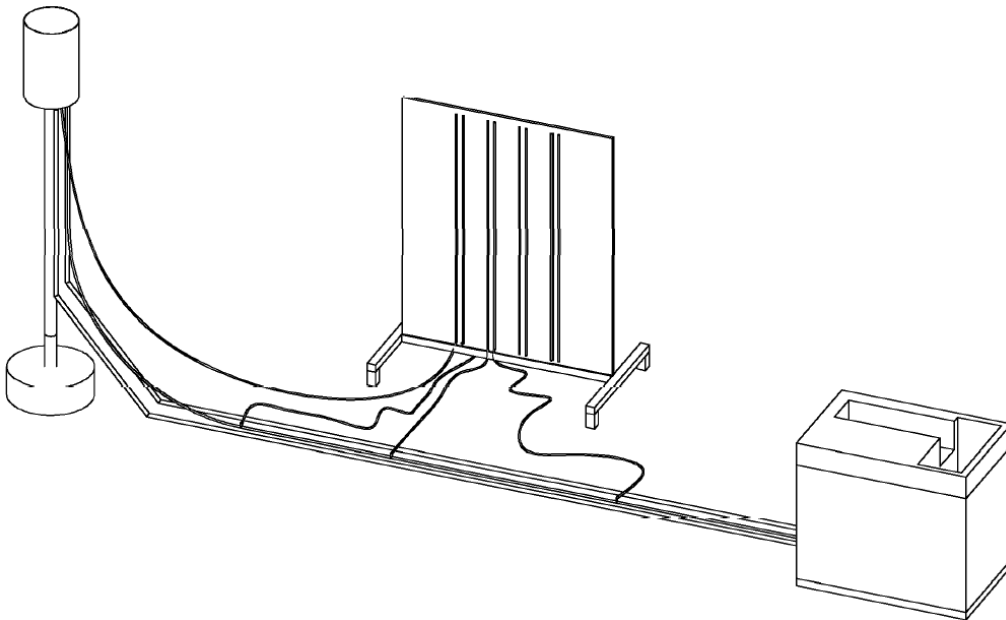
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 16. **Esquema de dispositivo**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 17. **Dispositivo de aforo**



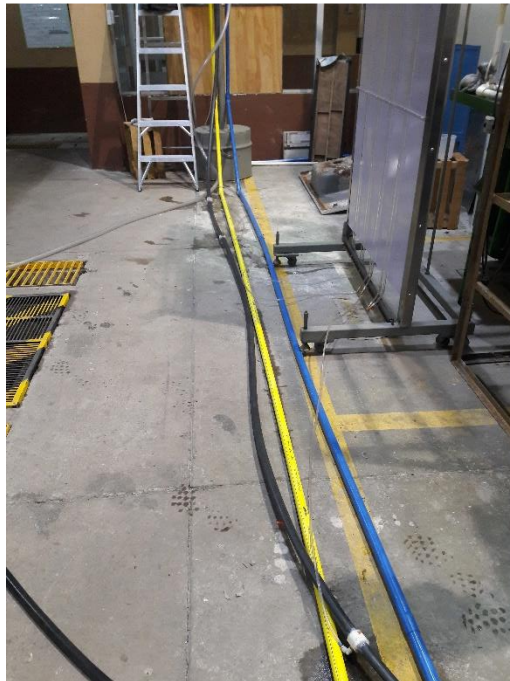
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 18. **Elaboración de dispositivo de aforo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Instalación de tuberías en dispositivo de aforo**



Fuente: elaboración de propia.

Figura 20. **Banco hidráulico para realizar aforos**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Procedimiento experimental

- Llenar los depósitos de agua para que haya una circulación por gravedad.
- Regular la válvula del banco hidráulico que permita la circulación de un caudal con carga constante desde el depósito de alimentación de agua.
- Ajustar la válvula a un caudal constante en la tubería de ensayo.
- Registrar la altura de los piezómetros en el tablero de control.
- Aforar tres veces el caudal en la tubería de ensayo para determinar el error de medición.
- Comprobar que el error de medición sea igual o menor al 2 %.

4.2.1. Método de aforo

En el aforo de tipo volumétrico se tuvo las siguientes consideraciones:

- Se graduó la válvula para mantener un caudal constante.
- La carga hidrostática del depósito de alimentación de agua se mantuvo constante mediante un sistema de drenaje de altura fija.
- La tubería de ensayo permaneció inmóvil en la posición del aforo.
- El volumen de aforo fue variable conforme al cambio gradual del caudal.
- Se registró el tiempo de llenado del volumen escogido iniciando con el caudal máximo.
- Se registró el valor de los aforos volumétricos diez veces, con el objetivo de obtener una tendencia y establecer una gráfica correlacionada.

Figura 21. Realización de aforo



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Datos obtenidos

La carga constante en el depósito de agua (h_1), la energía de presión en el inicio del tramo de un metro (h_2), la energía de presión en el final del tramo de un metro y el inicio en el segundo tramo de tres metros (h_3) y la energía de presión en el final del tramo de tres metros de longitud (h_4).

En el aforo volumétrico fue necesario registrar el tiempo de llenado en tres ocasiones (t_1 , t_2 y t_3) y de ser un registro válido ($\leq 2\%$) calcular un tiempo promedio (t_p) para obtener el porcentaje de error de medición con la expresión:

$$\%error = \frac{t_{m\acute{a}x} - t_{m\acute{i}n}}{t_{m\acute{a}x}} \leq 2\%$$

Donde:

$t_{m\acute{a}x}$ = tiempo de llenado mayor

$t_{m\acute{i}n}$ = tiempo de llenado menor

$\%error$ = porcentaje de error de medición en el aforo

Tabla VIII. Registro de datos tubería de 1/2"

Núm.	h_1 cm	h_2 Cm	h_3 cm	h_4 cm	t_1 s	t_2 s	t_3 S	error %	t_p s	Volumen l
1	131,00	74,00	59,75	22,50	18,19	18,22	18,06	0,88%	18,16	5
2	125,00	76,50	64,00	31,75	19,03	19,04	19,12	0,47%	19,06	5
3	126,00	79,00	67,25	32,00	20,13	20,10	20,04	0,45%	20,09	5
4	128,00	81,00	69,00	38,00	20,94	20,60	20,87	1,62%	20,80	5
5	139,00	96,00	84,50	55,25	21,35	21,00	21,13	1,64%	21,16	5
6	130,00	81,50	70,00	52,00	22,06	21,69	21,72	1,68%	21,82	5
7	135,00	99,75	90,50	66,50	22,85	23,07	23,10	1,08%	23,01	5
8	123,00	97,75	91,25	74,00	27,31	27,72	27,35	1,48%	27,46	5
9	130,00	112,75	108,25	96,25	33,85	33,81	34,25	1,28%	33,97	5
10	115,00	108,00	106,50	101,50	13,07	13,00	13,05	0,54%	13,04	1

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla IX. Registro de datos tubería de ¾"

Núm.	h ₁ cm	h ₂ cm	h ₃ cm	h ₄ cm	t ₁ s	t ₂ s	t ₃ s	error %	t _p s	Volumen l
1	111,25	73,50	64,75	30,75	24,66	24,59	24,41	1,01%	24,55	10
2	131,00	90,75	79,50	45,50	25,32	25,19	25,00	1,26%	25,17	10
3	139,25	105,25	97,50	67,00	26,31	25,90	26,22	1,56%	26,14	10
4	116,75	92,25	86,25	64,00	32,97	32,50	32,34	1,91%	32,60	10
5	134,00	115,50	111,50	94,50	36,47	36,72	36,28	1,20%	36,49	10
6	150,25	138,50	136,00	124,75	23,63	23,50	23,56	0,55%	23,56	5
7	120,00	110,50	108,00	99,00	31,66	31,81	31,56	0,79%	31,68	5
8	120,25	117,00	116,25	112,50	48,67	48,76	48,50	0,53%	48,64	5
9	90,00	89,75	89,50	89,25	39,75	39,72	39,38	0,93%	39,62	1
10	140,25	139,75	139,50	139,00	48,09	48,41	48,16	0,66%	48,22	1

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla X. Registro de datos tubería de 1"

Núm.	h ₁ cm	h ₂ cm	h ₃ cm	h ₄ Cm	t ₁ s	t ₂ S	t ₃ S	error %	t _p s	Volumen l
1	143,50	143,00	143,00	142,50	22,00	21,91	22,12	0,95%	22,01	1
2	152,75	148,25	148,00	145,50	26,04	26,38	26,78	2,76%	26,40	5
3	107,00	95,50	94,00	87,75	14,84	14,65	14,63	1,42%	14,71	5
4	140,75	122,75	119,00	109,00	11,44	11,56	11,41	1,30%	11,47	5
5	146,00	121,50	116,50	103,50	9,72	9,66	9,56	1,65%	9,65	5
6	132,00	102,75	96,75	81,50	8,66	8,59	8,50	1,85%	8,58	5
7	150,00	116,75	110,25	93,25	8,13	8,12	8,03	1,23%	8,09	5
8	127,00	90,50	82,25	65,00	7,53	7,46	7,41	1,59%	7,47	5
9	138,00	100,00	92,00	72,00	7,07	7,13	7,12	0,84%	7,11	5
10	150,00	110,00	102,00	81,50	6,96	6,97	6,91	0,86%	6,95	5

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.2.3. Cálculos y gráficas

La pérdida de energía en el tramo de un metro (hf 1m) fue obtenida de la diferencia de energía de presión entre el piezómetro 2 y 3 ($h_2 - h_3$) y para el tramo de tres metros con los piezómetros 3 y 4 ($h_3 - h_4$).

El caudal (Q) volumétrico fue obtenido con la relación volumen (V) sobre tiempo promedio (t_p). El área de sección irregular elíptica con la relación siguiente:

$$\frac{\text{Área patrón}}{\text{Peso del área patrón}} = \frac{\text{Área de la tubería (X)}}{\text{Peso de la huella del diámetro interno}}$$

4.2.3.1. Resultados de tubería de 1/2"

El área para la tubería de 1/2" se expresa como:

$$\frac{1 \text{ cm}^2}{0,168 \text{ gr}} = \frac{X \text{ cm}^2}{0,307 \text{ gr}} \text{ entonces } X = \frac{0,307}{0,168} = 1,8274 \text{ cm}^2$$

La "X" representa el área del diámetro interno de la tubería de 1/2", para el cálculo de la velocidad y posteriormente la energía cinética (E_c). Otro parámetro en el experimento es la determinación del factor de fricción (f) a través de las ecuaciones de Suwamee-Jain (S-J), de Blasius (B) y Hazen y Williams (H-W).

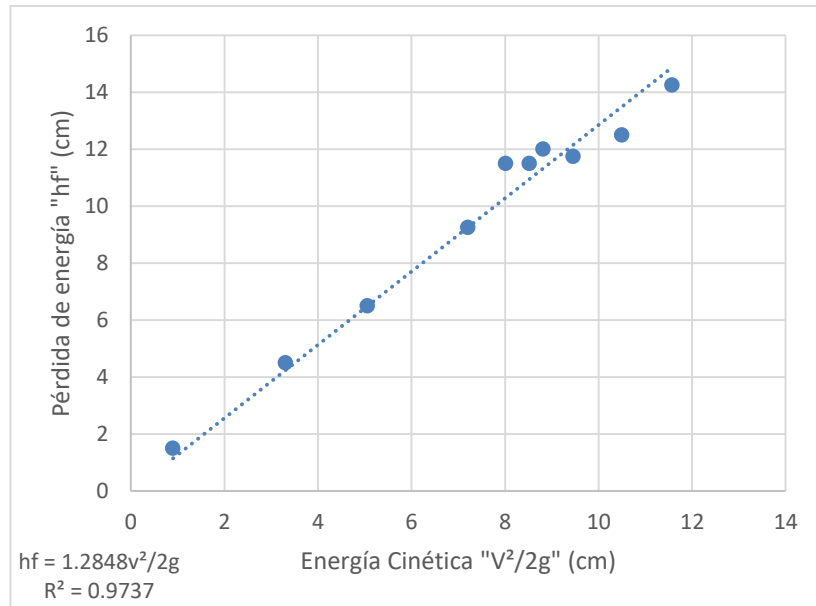
Las pérdidas de energía (hf) empíricas se obtuvieron con las expresiones de Cruciani Margaritora (C-M), Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Varonese-Datei (V-D), Manning (M) y Darcy (D).

Tabla XI. Resultados diámetro de 1/2"

Núm.	hf 1m cm	hf 3m cm	Q l/s	Q m³/s	Área cm²	Velocidad cm/s	Velocidad m/s	Ec cm
1	14,25	37,25	0,2754	0,0003	1,8274	150,70	1,5070	11,5745
2	12,50	32,25	0,2623	0,0003	1,8274	143,53	1,4353	10,4997
3	11,75	35,25	0,2489	0,0002	1,8274	136,19	1,3619	9,4540
4	12,00	31,00	0,2403	0,0002	1,8274	131,52	1,3152	8,8167
5	11,50	29,25	0,2363	0,0002	1,8274	129,31	1,2931	8,5220
6	11,50	18,00	0,2291	0,0002	1,8274	125,38	1,2538	8,0118
7	9,25	24,00	0,2173	0,0002	1,8274	118,93	1,1893	7,2089
8	6,50	17,25	0,1821	0,0002	1,8274	99,64	0,9964	5,0603
9	4,50	12,00	0,1472	0,0001	1,8274	80,55	0,8055	3,3066
10	1,50	5,00	0,0767	0,0001	1,8274	41,97	0,4197	0,8976

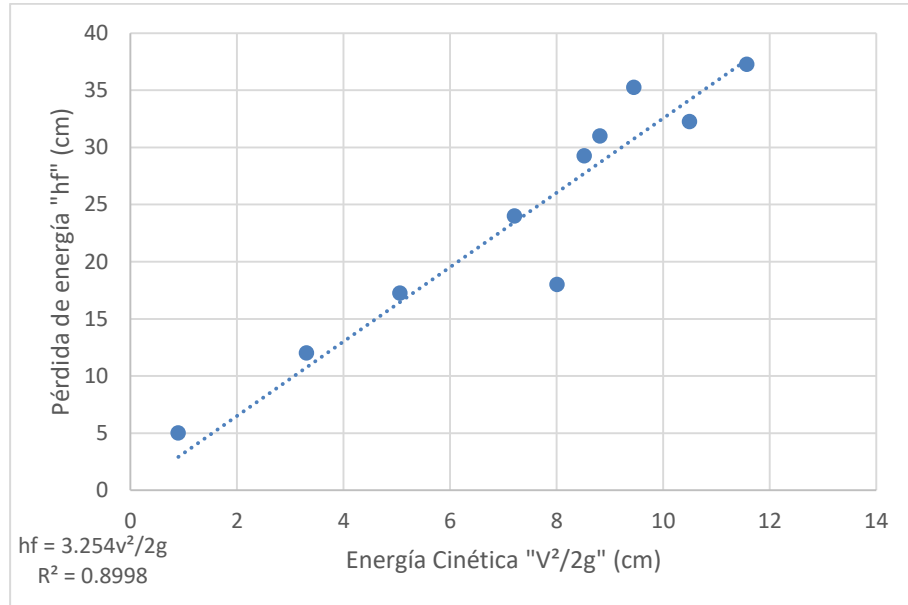
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 22. Factor de pérdida diámetro 1/2" longitud 1m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 23. Factor de pérdida diámetro ½” longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XII. Factor de fricción diámetro de ½”

Núm.	Reynold's	Tipo de flujo	Factor f S-J	Factor f B
1	20821	TURBULENTO	0,0269	0,0263
2	19830	TURBULENTO	0,0272	0,0266
3	18817	TURBULENTO	0,0275	0,0270
4	18172	TURBULENTO	0,0277	0,0272
5	17865	TURBULENTO	0,0278	0,0273
6	17322	TURBULENTO	0,0280	0,0275
7	16431	TURBULENTO	0,0283	0,0279
8	13767	TURBULENTO	0,0295	0,0292
9	11128	TURBULENTO	0,0311	0,0308
10	5798	TURBULENTO	0,0369	0,0362

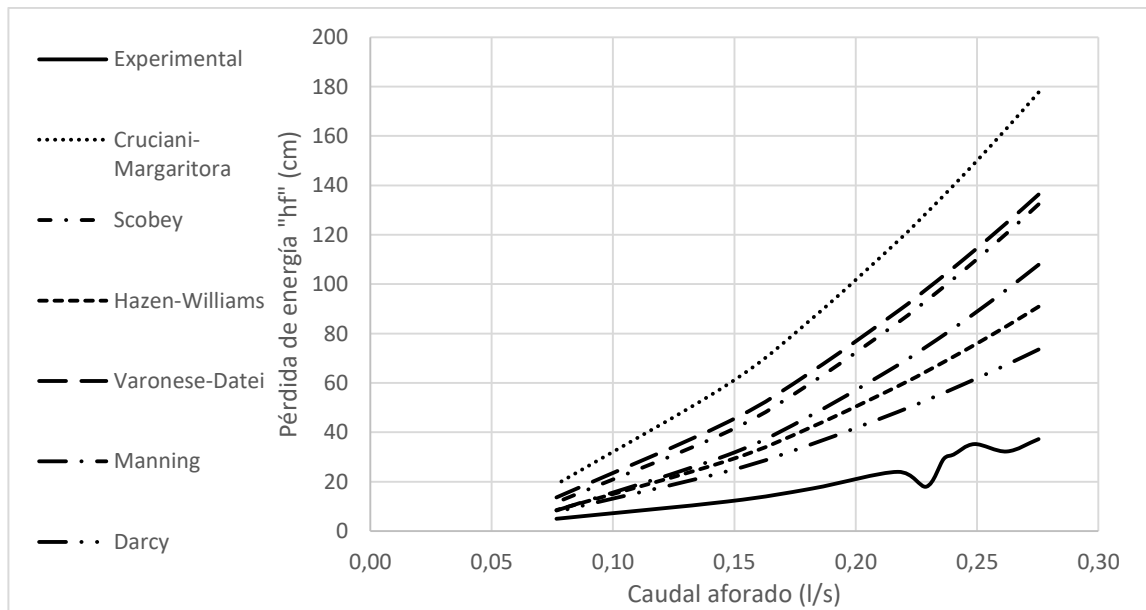
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XIII. Pérdida de energía de ecuaciones empíricas diámetro 1/2"

Núm.	"hf" C-M cm	Factor f H-W	"hf" H-W cm	"hf" S cm	"hf" V-D cm	"hf" M cm	"hf" D cm
1	177,65	0,0250	90,87	132,33	136,31	107,86	73,55
2	163,13	0,0252	83,04	120,63	124,86	97,84	67,42
3	148,82	0,0254	75,36	109,18	113,61	88,10	61,40
4	140,01	0,0255	70,65	102,18	106,70	82,16	57,71
5	135,90	0,0256	68,46	98,93	103,48	79,41	55,99
6	128,76	0,0257	64,66	93,30	97,89	74,66	53,00
7	117,39	0,0259	58,64	84,39	89,01	67,18	48,26
8	86,13	0,0266	42,27	60,30	64,73	47,15	35,29
9	59,36	0,0274	28,52	40,25	44,14	30,81	24,28
10	18,97	0,0303	8,54	11,66	13,65	8,36	7,83

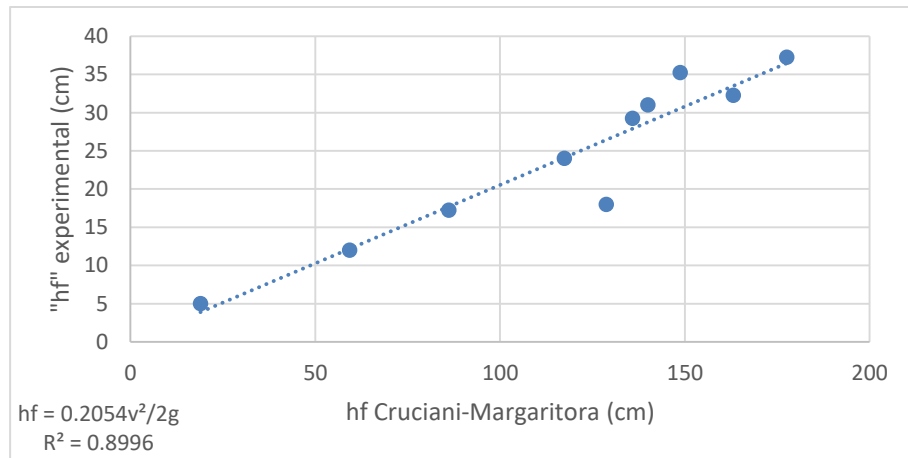
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 24. Comparación de pérdida de energía diámetro 1/2" longitud 3m



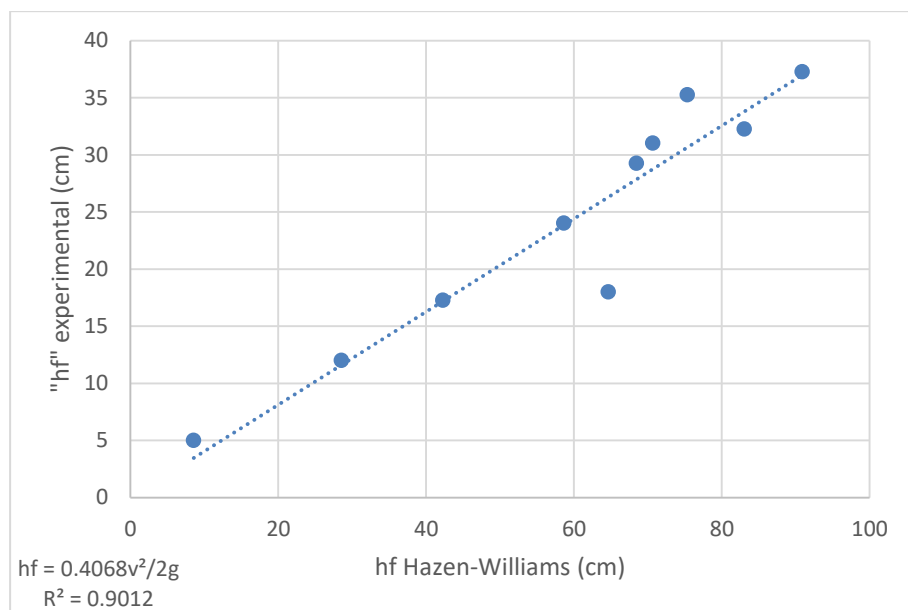
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 25. **Comparación “hf”, Cruciani Margaritora diámetro ½” longitud 3m**



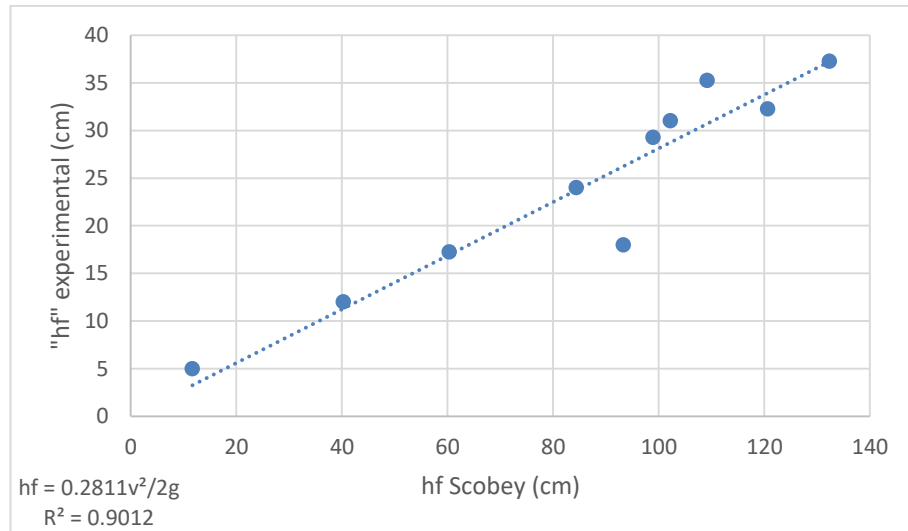
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 26. **Comparación “hf” Hazen-Williams, diámetro ½” longitud 3m**



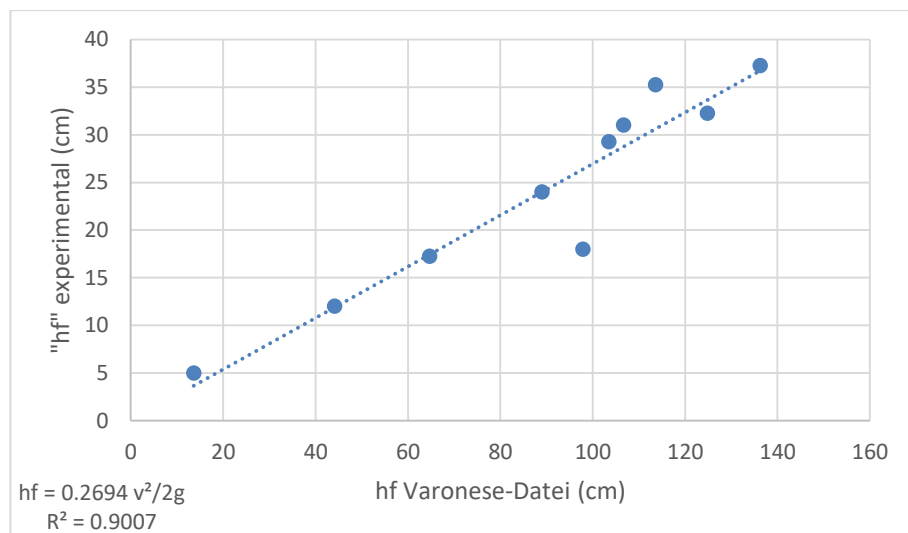
Fuente: elaboración propia, empleando Excel

Figura 27. Comparación de “hf” Scobey, diámetro ½” longitud 3m



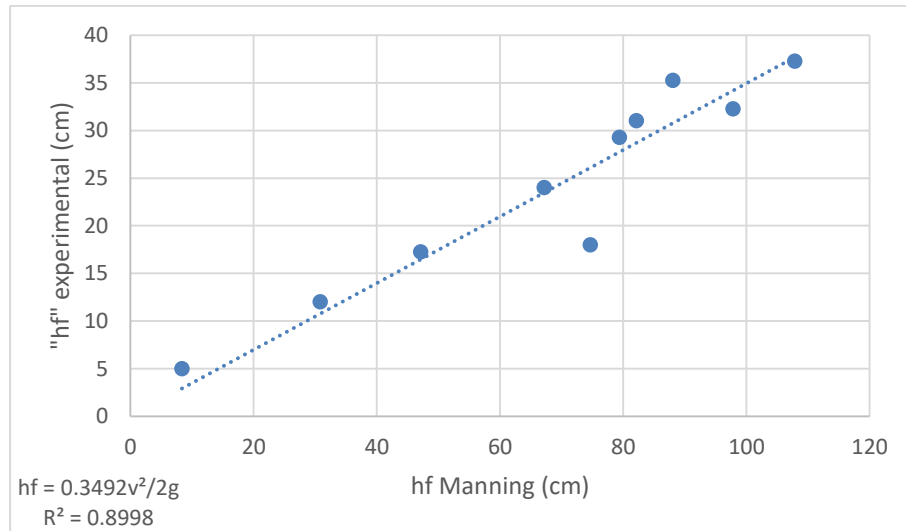
Fuente: elaboración propia, con programa Excel.

Figura 28. Comparación de “hf” Varonese-Datei, diámetro ½” longitud 3m



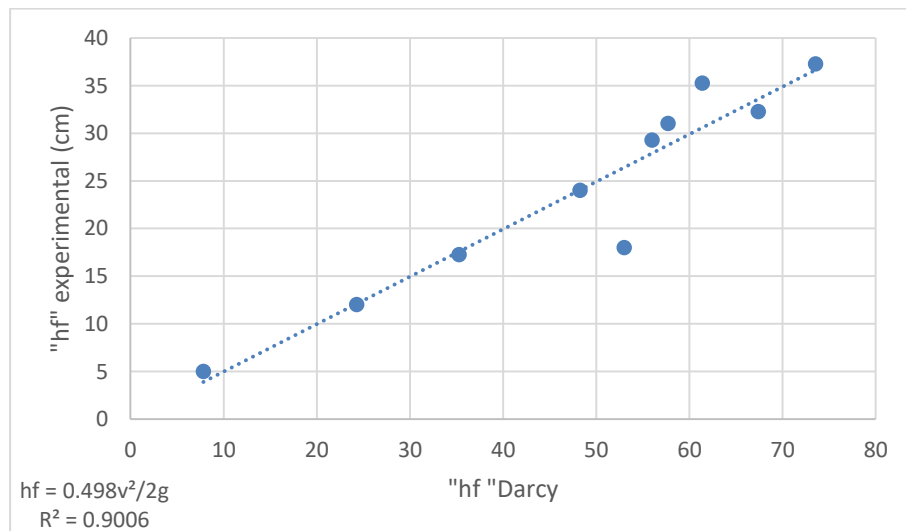
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 29. Comparación de "hf" Manning, diámetro 1/2" longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 30. Comparación de "hf" Darcy, diámetro de 1/2" longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XIV. **Resumen de constantes de ajuste para ecuaciones empíricas
diámetro ½"**

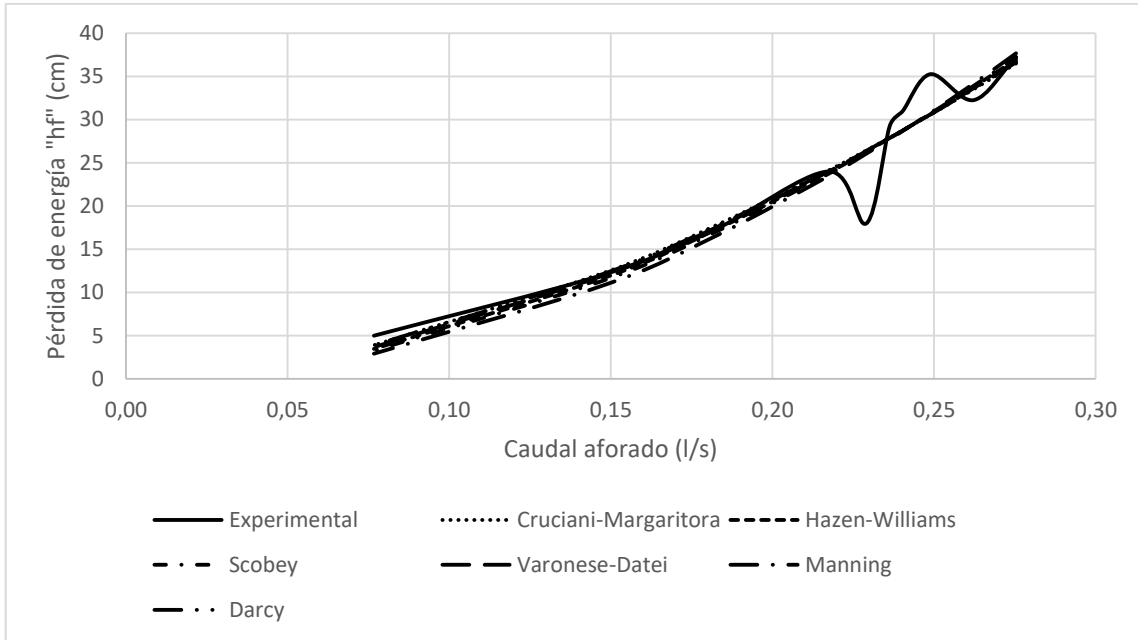
Núm.	"k1" C-M 0,2054	"k2" H-W 0,4068	"k3" S 0,2811	"k4" V-D 0,2694	"k5" M 0,3492	"k6" D 0,498
1	36,49	36,97	37,20	36,72	37,66	36,63
2	33,51	33,78	33,91	33,64	34,17	33,58
3	30,57	30,66	30,69	30,61	30,76	30,58
4	28,76	28,74	28,72	28,74	28,69	28,74
5	27,91	27,85	27,81	27,88	27,73	27,88
6	26,45	26,30	26,23	26,37	26,07	26,39
7	24,11	23,86	23,72	23,98	23,46	24,03
8	17,69	17,20	16,95	17,44	16,47	17,57
9	12,19	11,60	11,31	11,89	10,76	12,09
10	3,90	3,47	3,28	3,68	2,92	3,90

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Cuando se relaciona la pérdida de energía experimental observada con cualquier pérdida de energía calculada con las ecuaciones empíricas, se obtienen un coeficiente de proporción (K) que acerca el valor de pérdida de energía empírica a la experimental.

El ejemplo es cuando se calcula la pérdida de energía con la ecuación empírica de Cruciani-Margaritora se obtiene un valor de 177,65 cm, que al multiplicarlo por su factor de proporción (K1) 0,2054 resulta 36,49 cm que se aproxima al valor experimental de 37,25 cm.

Figura 31. Ajuste de pérdida de energía ($k \cdot hf$ teórica) diámetro 1/2” longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.2.3.2. Resultados de tubería de 3/4"

El área para la tubería de 3/4" se expresa como:

$$\frac{1 \text{ cm}^2}{0,168 \text{ gr}} = \frac{X \text{ cm}^2}{0,369 \text{ gr}} \text{ entonces } X = \frac{0,369}{0,168} = 2,1964 \text{ cm}^2$$

La "X" representa el área del diámetro interno de la tubería de 3/4", para el cálculo de la velocidad y posteriormente la energía cinética (E_c). Otro parámetro en el experimento es la determinación del factor de fricción (f) a través de las ecuaciones de Suwamee-Jain (S-J), de Blasius (B) y Hazen y Williams (H-W).

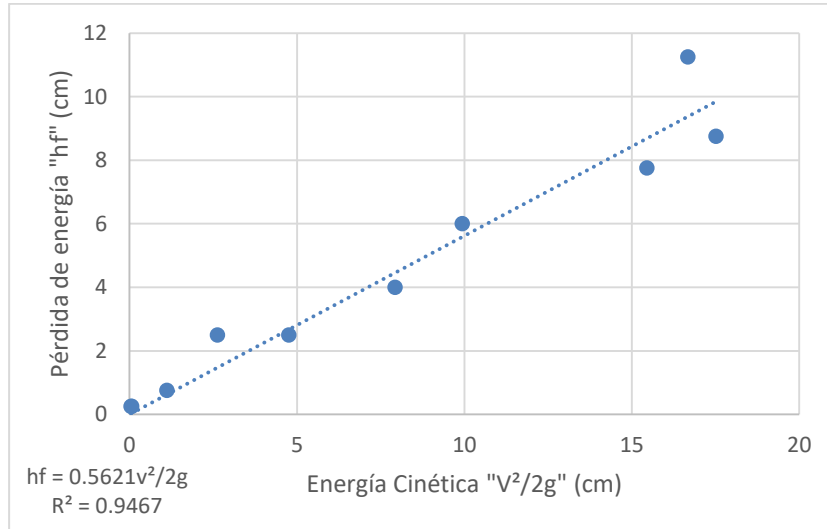
Las pérdidas de energía (hf) empíricas se obtuvieron con las expresiones de Cruciani Margaritora (C-M), Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Varonese-Datei (V-D), Manning (M) y Darcy (D).

Tabla XV. **Resultados diámetro de ¾"**

Núm.	hf 1m cm	hf 3m cm	Q l/s	Q m³/s	Área cm²	Velocidad cm/s	Velocidad m/s	Ec cm
1	8,75	34,00	0,4073	0,0004	2,1964	185,43	1,8543	17,5250
2	11,25	34,00	0,3973	0,0004	2,1964	180,89	1,8089	16,6768
3	7,75	30,50	0,3825	0,0004	2,1964	174,15	1,7415	15,4581
4	6,00	22,25	0,3067	0,0003	2,1964	139,65	1,3965	9,9393
5	4,00	17,00	0,2740	0,0003	2,1964	124,77	1,2477	7,9347
6	2,50	11,25	0,2122	0,0002	2,1964	96,61	0,9661	4,7571
7	2,50	9,00	0,1578	0,0002	2,1964	71,87	0,7187	2,6323
8	0,75	3,75	0,1028	0,0001	2,1964	46,80	0,4680	1,1163
9	0,25	0,25	0,0252	0,0000	2,1964	11,49	0,1149	0,0673
10	0,25	0,50	0,0207	0,0000	2,1964	9,44	0,0944	0,0454

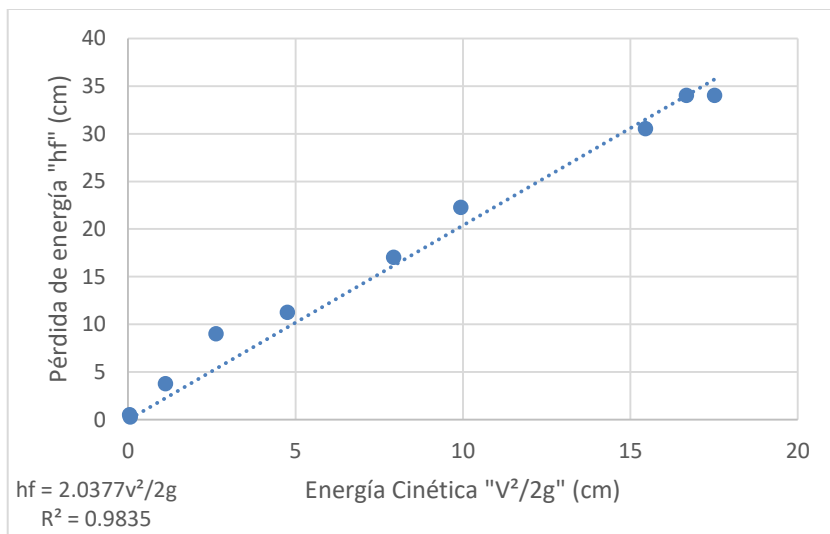
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 32. Factor de pérdida diámetro de 3/4" longitud 1m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 33. Factor de pérdida diámetro 3/4" longitud 3m



Fuente/: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XVI. **Factor de fricción diámetro de 3/4"**

Núm.	Reynold's	Tipo de flujo	Factor f S-J	Factor f B
1	25620	TURBULENTO	0,0253	0,0250
2	24992	TURBULENTO	0,0254	0,0251
3	24061	TURBULENTO	0,0256	0,0254
4	19294	TURBULENTO	0,0269	0,0268
5	17239	TURBULENTO	0,0276	0,0276
6	13348	TURBULENTO	0,0294	0,0294
7	9929	TURBULENTO	0,0317	0,0317
8	6466	TURBULENTO	0,0356	0,0352
9	1588	LAMINAR	0,0558	0,0501
10	1305	LAMINAR	0,0601	0,0526

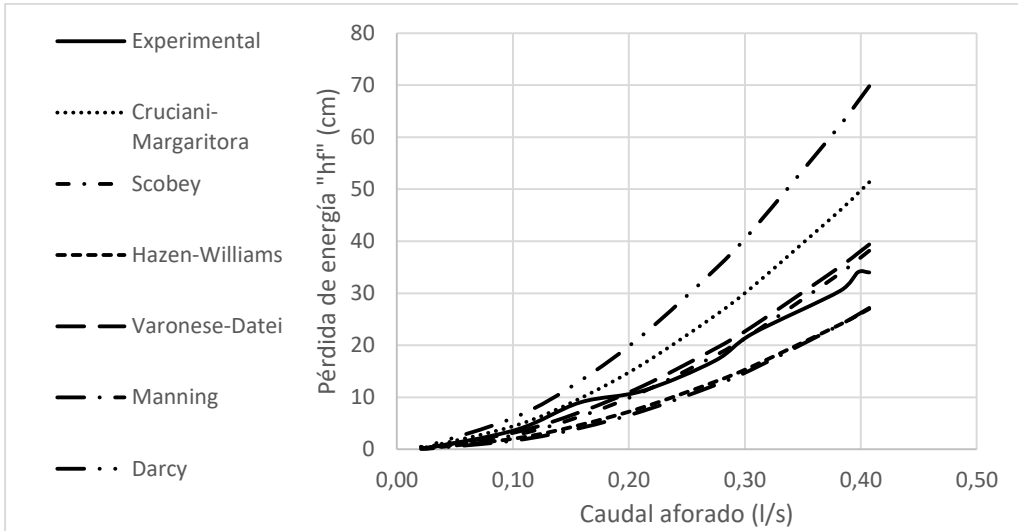
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XVII. **Pérdida de energía de ecuaciones empíricas diámetro 3/4"**

Núm.	"hf" C-M cm	Factor F H-W	"hf" H-W Cm	"hf" S cm	"hf" V-D Cm	"hf" M cm	"hf" D cm
1	51,35	0,0226	26,99	38,17	39,37	27,18	69,80
2	49,17	0,0227	25,78	36,41	37,66	25,86	66,77
3	46,01	0,0228	24,03	33,88	35,17	23,97	62,40
4	31,26	0,0236	15,97	22,27	23,63	15,41	42,15
5	25,67	0,0240	12,97	17,98	19,30	12,30	34,53
6	16,41	0,0249	8,08	11,06	12,18	7,38	22,01
7	9,78	0,0261	4,67	6,30	7,15	4,08	13,13
8	4,61	0,0278	2,11	2,79	3,30	1,73	6,25
9	0,40	0,0343	0,16	0,19	0,26	0,10	0,59
10	0,28	0,0353	0,11	0,13	0,19	0,07	0,43

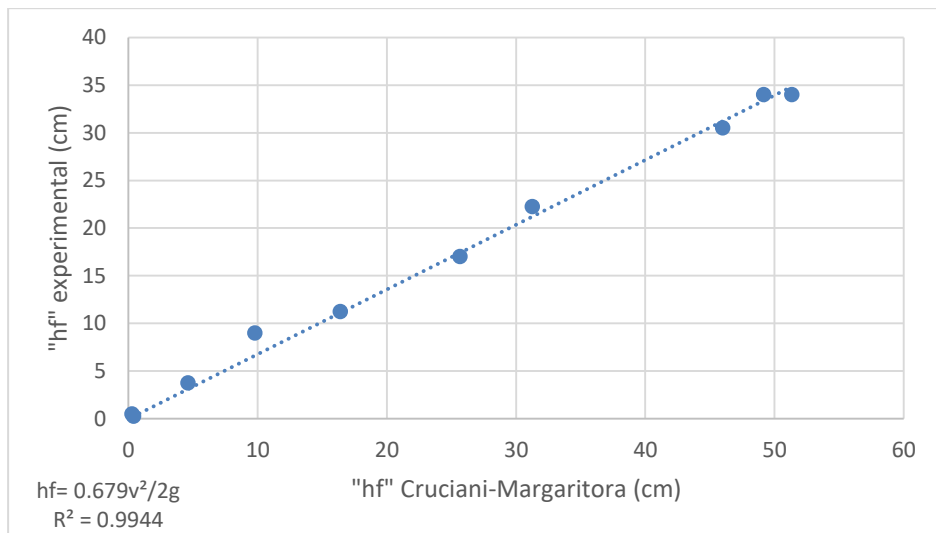
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 34. Comparación de pérdida de energía diámetro 3/4" longitud 3m



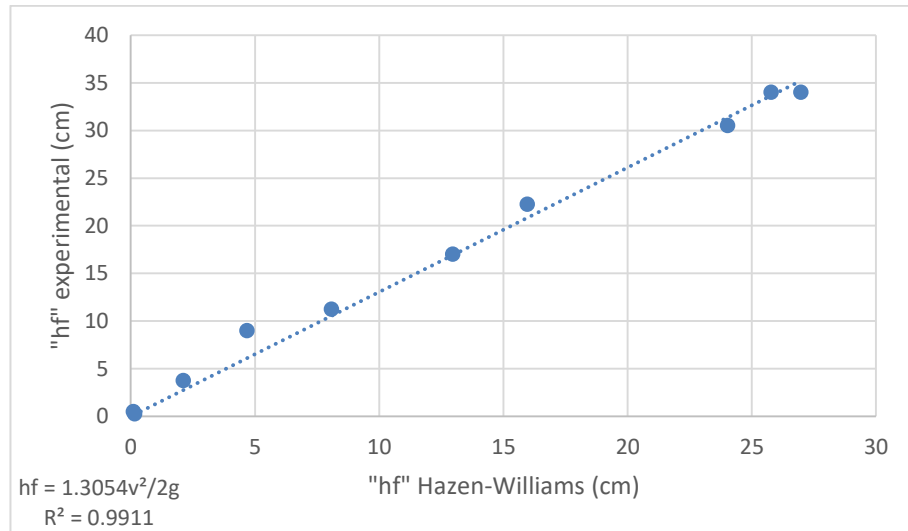
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 35. Comparación de "hf" Cruciani Margaritora, diámetro 3/4" longitud 3m



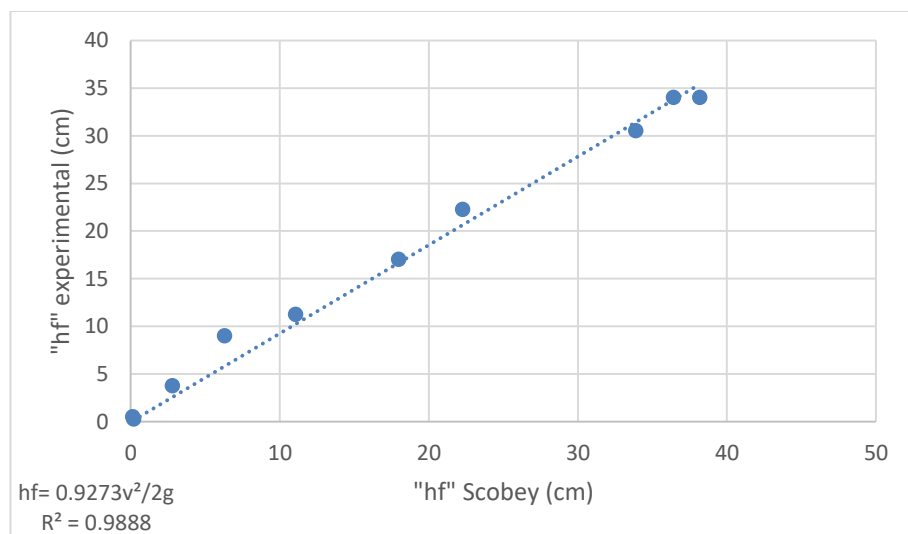
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 36. Comparación "hf" Hazen-Williams, diámetro 3/4" longitud 3m



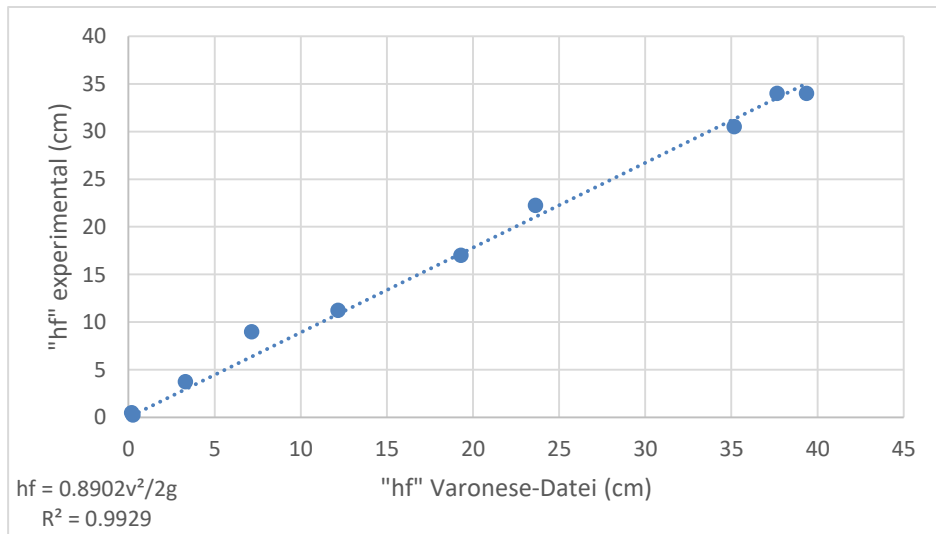
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 37. Comparación de "hf" Scobey, diámetro 3/4" longitud 3m



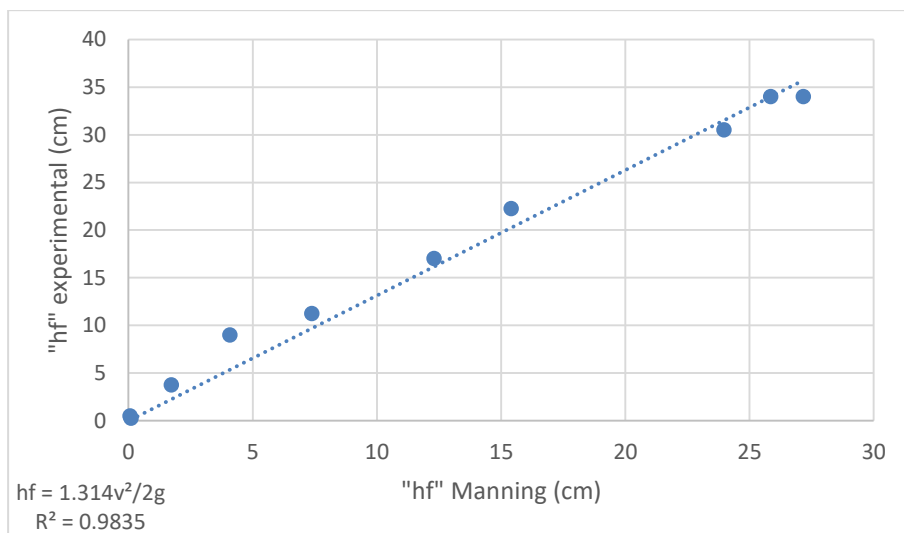
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 38. **Comparación de hf" Varonese-Datei, diámetro ¾" longitud 3m**



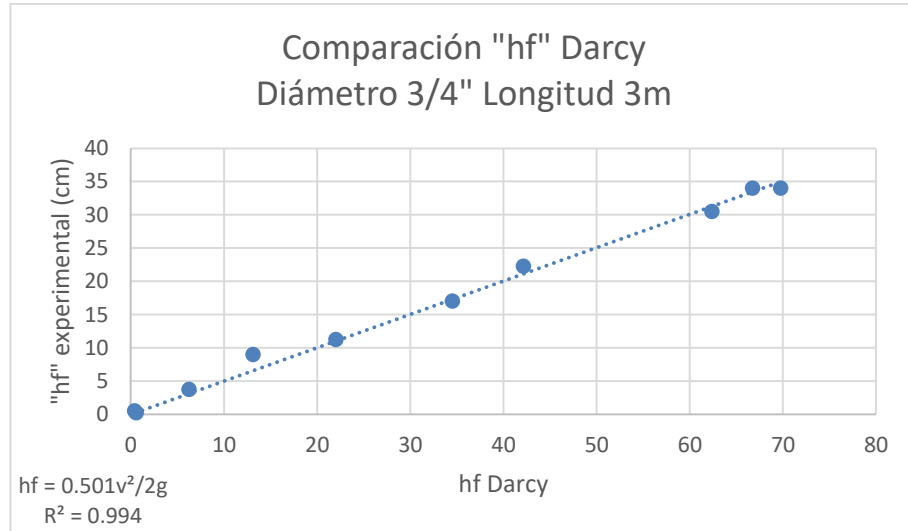
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 39. **Comparación de "hf" Manning, diámetro ¾" longitud 3m**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 40. Comparación de "hf" Darcy, diámetro 3/4" longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

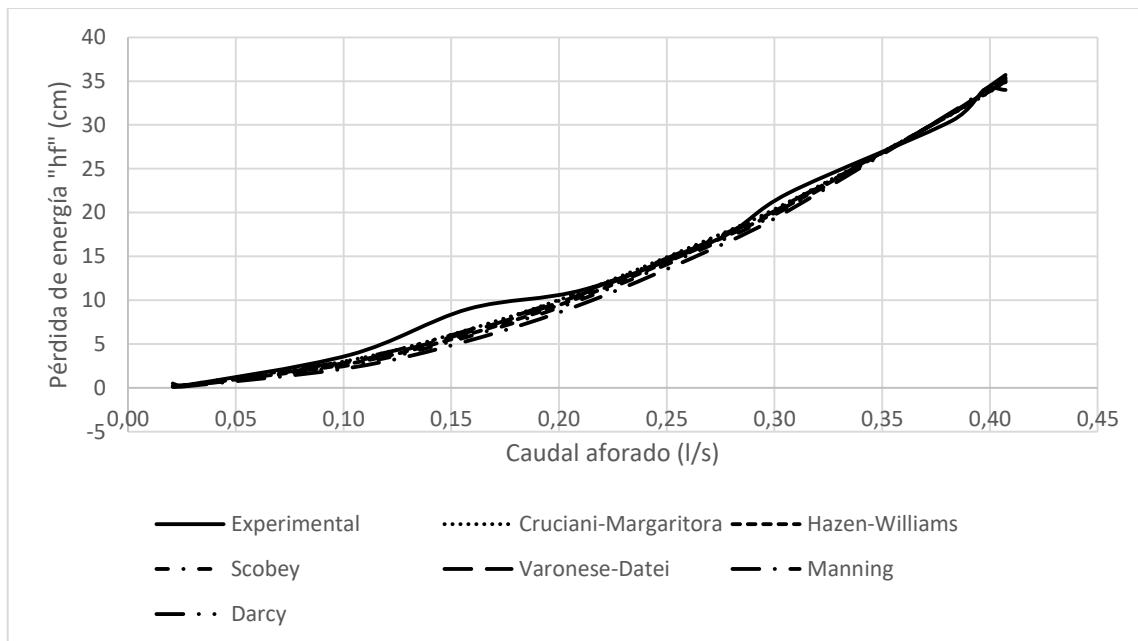
Tabla XVIII. Resumen de constantes de ajuste para ecuaciones empíricas diámetro 3/4"

Núm.	"k1" C-M	"k2" H-W	"k3" S	"k4" V-D	"k5" M	"k6" D
	0,679	1,3054	0,9273	0,8902	1,314	0,501
1	34,87	35,23	35,40	35,05	35,71	34,97
2	33,39	33,65	33,77	33,52	33,98	33,45
3	31,24	31,37	31,42	31,31	31,50	31,26
4	21,23	20,85	20,65	21,04	20,25	21,12
5	17,43	16,93	16,67	17,18	16,17	17,30
6	11,14	10,54	10,26	10,84	9,69	11,03
7	6,64	6,10	5,85	6,36	5,36	6,58
8	3,13	2,76	2,59	2,94	2,27	3,13
9	0,27	0,21	0,18	0,23	0,14	0,30
10	0,19	0,14	0,12	0,16	0,09	0,22

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El ejemplo es cuando se calcula la pérdida de energía con la ecuación empírica de Cruciani-Margaritora se obtiene un valor de 51,35 cm, que al multiplicarlo por su factor de proporción (K1) 0,679 resulta 34,87 cm que se aproxima al valor experimental de 34,00 cm.

Figura 41. Ajuste de pérdida de energía ($k \cdot h_f$ teórica) diámetro $\frac{3}{4}$ " longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.2.3.3. Resultados de tubería de 1"

El área para la tubería de $\frac{3}{4}$ " se expresa como:

$$\frac{1 \text{ cm}^2}{0,168 \text{ gr}} = \frac{X \text{ cm}^2}{0,728 \text{ gr}} \text{ entonces } X = \frac{0,728}{0,168} = 4,3333 \text{ cm}^2$$

La X representa el área del diámetro interno de la tubería de 1", para el cálculo de la velocidad y posteriormente la energía cinética (Ec). Otro parámetro en el experimento es la determinación del factor de fricción (f) a través de las ecuaciones de Suwamee-Jain (S-J), de Blasius (B) y Hazen y Williams (H-W).

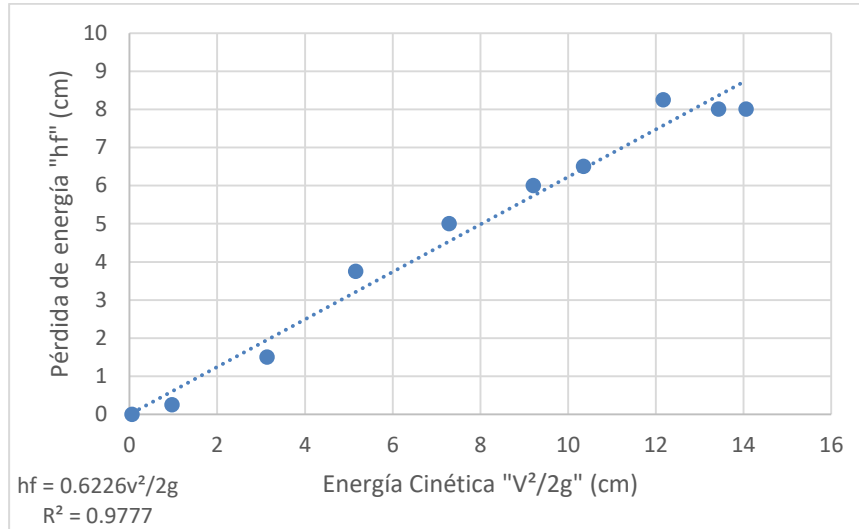
Las pérdidas de energía (hf) empíricas se obtuvieron con las expresiones de Cruciani Margaritora (C-M), Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Varonese-Datei (V-D), Manning (M) y Darcy (D).

Tabla XIX. **Resultados diámetro de 1"**

Núm.	hf 1m Cm	hf 3m cm	Q l/s	Q m ³ /s	Área cm ²	Velocidad cm/s	Velocidad m/s	Ec cm
1	8,00	20,50	0,7198	0,0007	4,3333	166,10	1,6610	14,0621
2	8,00	20,00	0,7036	0,0007	4,3333	162,36	1,6236	13,4360
3	8,25	17,25	0,6696	0,0007	4,3333	154,53	1,5453	12,1717
4	6,50	17,00	0,6178	0,0006	4,3333	142,57	1,4257	10,3597
5	6,00	15,25	0,5825	0,0006	4,3333	134,43	1,3443	9,2107
6	5,00	13,00	0,5183	0,0005	4,3333	119,61	1,1961	7,2920
7	3,75	10,00	0,4359	0,0004	4,3333	100,60	1,0060	5,1579
8	1,50	6,25	0,3400	0,0003	4,3333	78,46	0,7846	3,1374
9	0,25	2,50	0,1894	0,0002	4,3333	43,71	0,4371	0,9736
10	0,00	0,50	0,0454	0,0000	4,3333	10,48	0,1048	0,0560

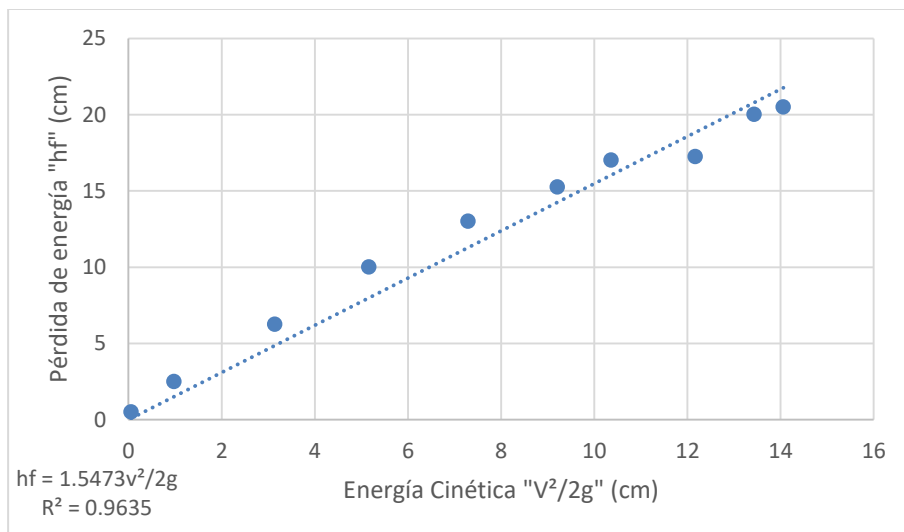
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 42. Factor de pérdida diámetro de 1" longitud 1m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 43. Factor de pérdida diámetro de 1" longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XX. **Factor de fricción diámetro de 1”**

Núm.	Reynold's	Tipo de flujo	Factor f S-J	Factor f B
1	1449	LAMINAR	0,0577	0,0512
2	6039	TURBULENTO	0,0361	0,0358
3	10840	TURBULENTO	0,0308	0,0310
4	13899	TURBULENTO	0,0289	0,0291
5	16526	TURBULENTO	0,0277	0,0279
6	18573	TURBULENTO	0,0270	0,0271
7	19698	TURBULENTO	0,0266	0,0267
8	21351	TURBULENTO	0,0261	0,0261
9	22433	TURBULENTO	0,0258	0,0258
10	22949	TURBULENTO	0,0257	0,0257

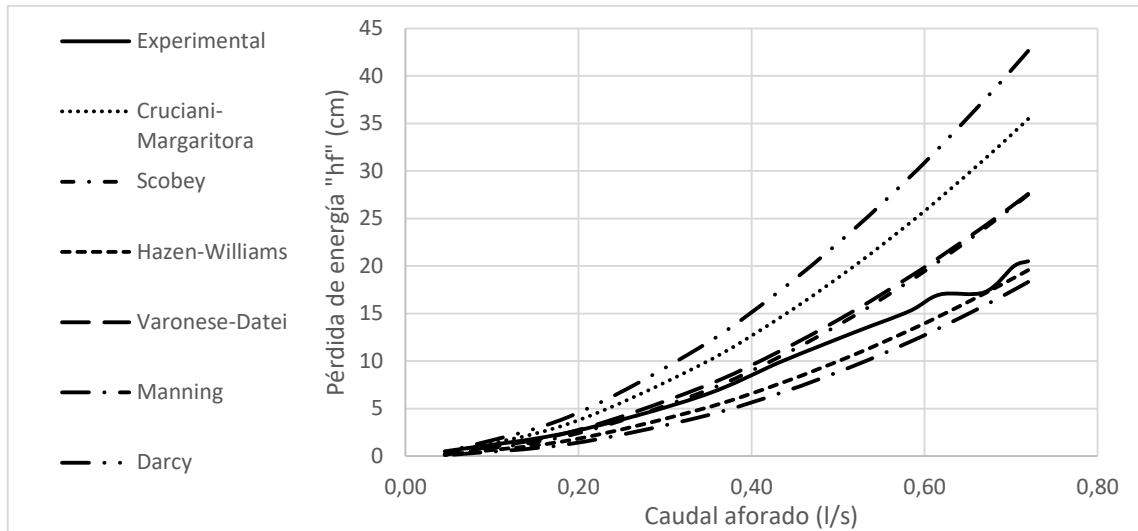
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXI. **Pérdida de energía de ecuaciones empíricas diámetro 1”**

Núm.	"hf" C-M cm	Factor F H-W	"hf" H-W cm	"hf" S Cm	"hf" V-D Cm	"hf" M cm	"hf" D cm
1	35,47	0,0219	19,56	27,50	27,5839	18,32	42,63
2	34,09	0,0220	18,76	26,34	26,4761	17,50	40,95
3	31,26	0,0221	17,12	23,98	24,2228	15,86	37,51
4	27,15	0,0224	14,75	20,57	20,9519	13,50	32,53
5	24,50	0,0226	13,23	18,40	18,8483	12,00	29,32
6	19,97	0,0230	10,66	14,74	15,2748	9,50	23,87
7	14,75	0,0236	7,74	10,61	11,1851	6,72	17,61
8	9,55	0,0245	4,88	6,61	7,1504	4,09	11,41
9	3,43	0,0267	1,65	2,18	2,4944	1,27	4,16
10	0,28	0,0331	0,12	0,14	0,1910	0,07	0,38

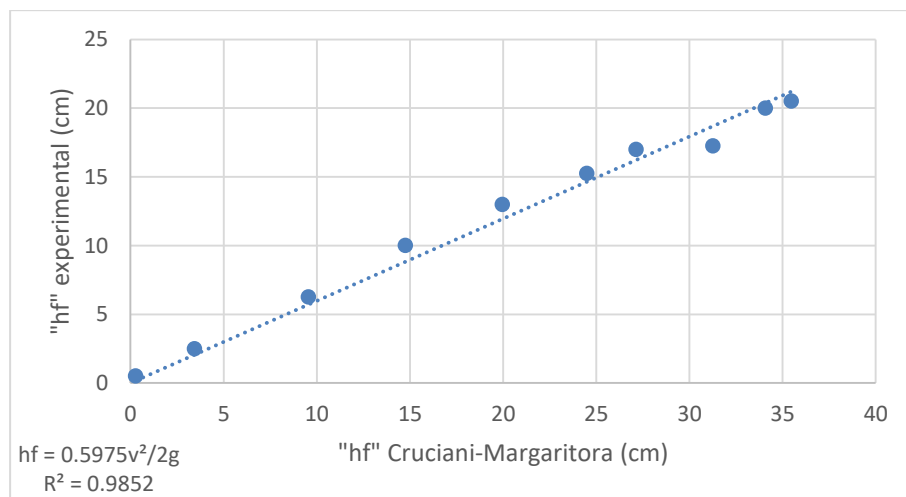
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 44. Comparación de pérdida de energía diámetro 1" longitud 3m



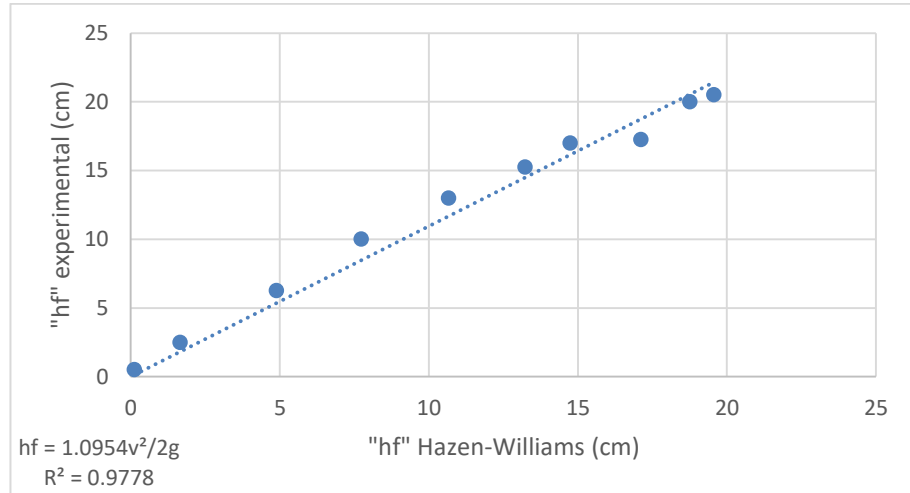
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 45. Comparación de "hf" Cruciani Margaritora, diámetro 1" longitud 3m



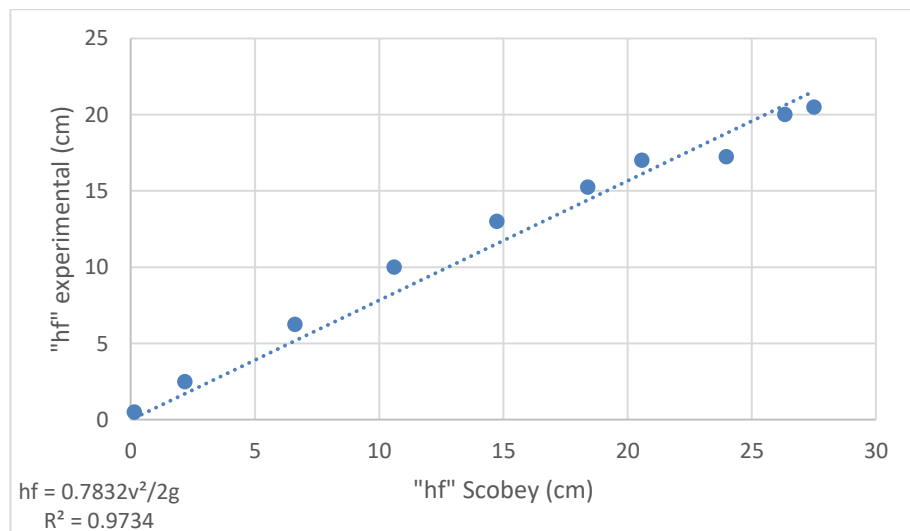
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 46. **Comparación hf” Hazen-Williams, diámetro 1” longitud 3m**



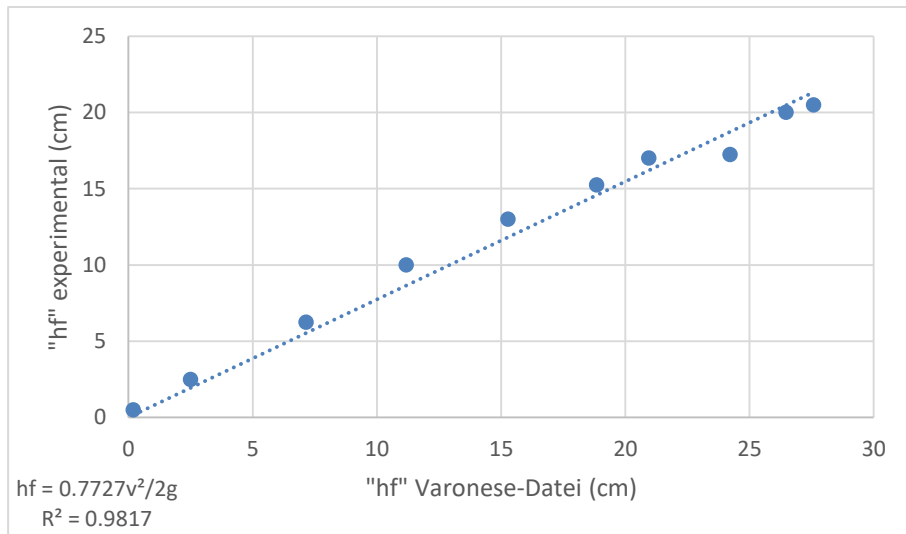
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 47. **Comparación de “hf” Scobey, diámetro de 1” longitud 3m**



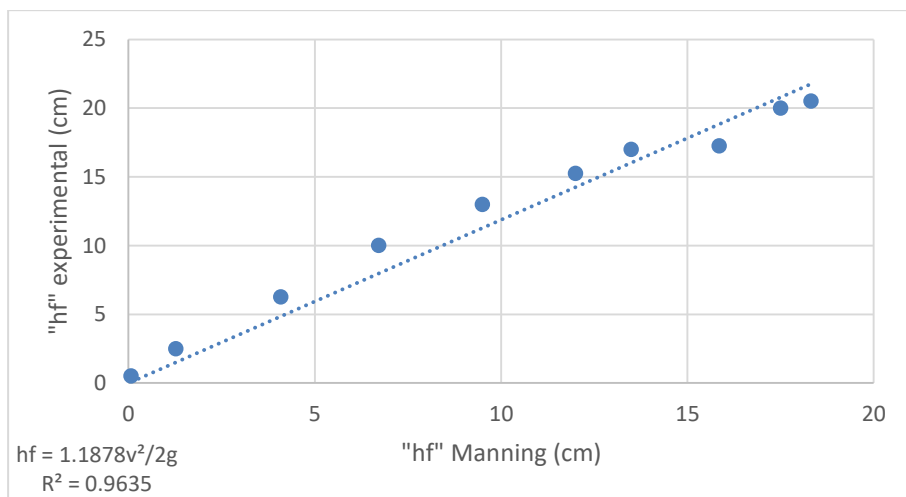
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 48. **Comparación de “hf” Varonese-Datei, diámetro 1” longitud 3m**



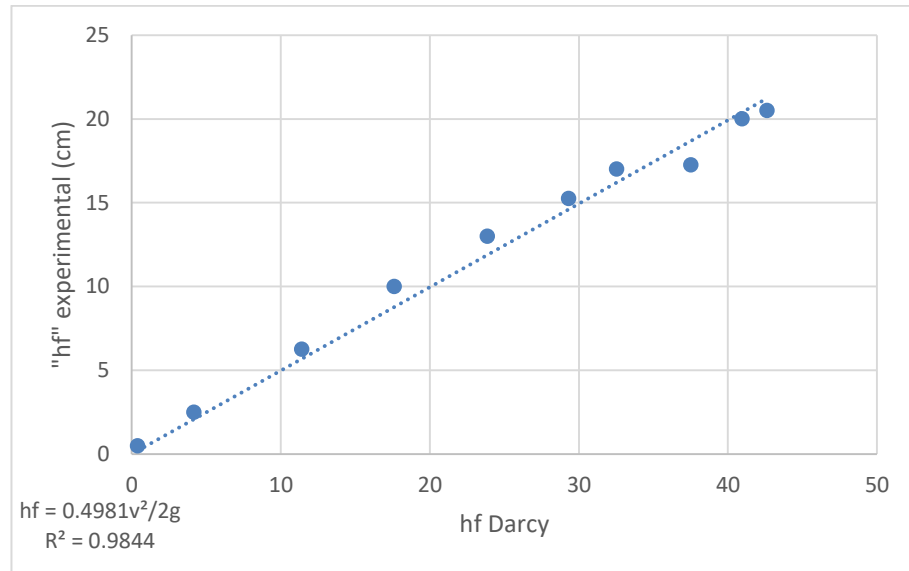
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 49. **Comparación de “hf” Manning, diámetro 1” Longitud 3m**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 50. Comparación de "hf" Darcy, diámetro 1" longitud 3m



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

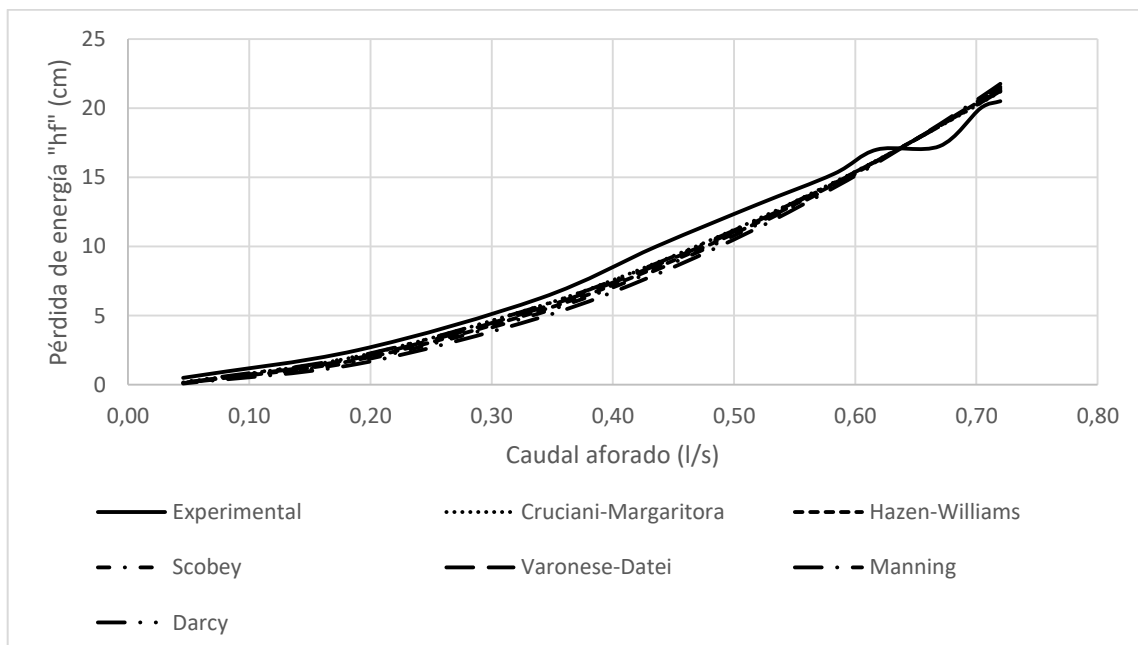
Tabla XXII. Resumen de constantes de ajuste para ecuaciones empíricas diámetro 1"

Núm.	"k1" C-M 0,5975	"k2" H-W 1,0954	"k3" S 0,7832	"k4" V-D 0,7727	"k5" M 1,1878	"k6" D 0,4981
1	21,19	21,43	21,54	21,31	21,76	21,24
2	20,37	20,55	20,63	20,46	20,79	20,39
3	18,68	18,75	18,78	18,72	18,83	18,68
4	16,22	16,15	16,11	16,19	16,03	16,20
5	14,64	14,49	14,41	14,56	14,25	14,60
6	11,93	11,67	11,54	11,80	11,28	11,89
7	8,81	8,47	8,31	8,64	7,98	8,77
8	5,70	5,35	5,18	5,53	4,85	5,68
9	2,05	1,81	1,70	1,93	1,51	2,07
10	0,17	0,13	0,11	0,15	0,09	0,19

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El ejemplo es cuando se calcula la pérdida de energía con la ecuación empírica de Cruciani-Margaritora se obtiene un valor de 35,47 cm, que al multiplicarlo por su factor de proporción (K1) 0,5975 resulta 21,19 cm que se aproxima al valor experimental de 20,50 cm.

Figura 51. Ajuste de pérdida de energía ($k \cdot hf$ teórica) diámetro 1” longitud 3m



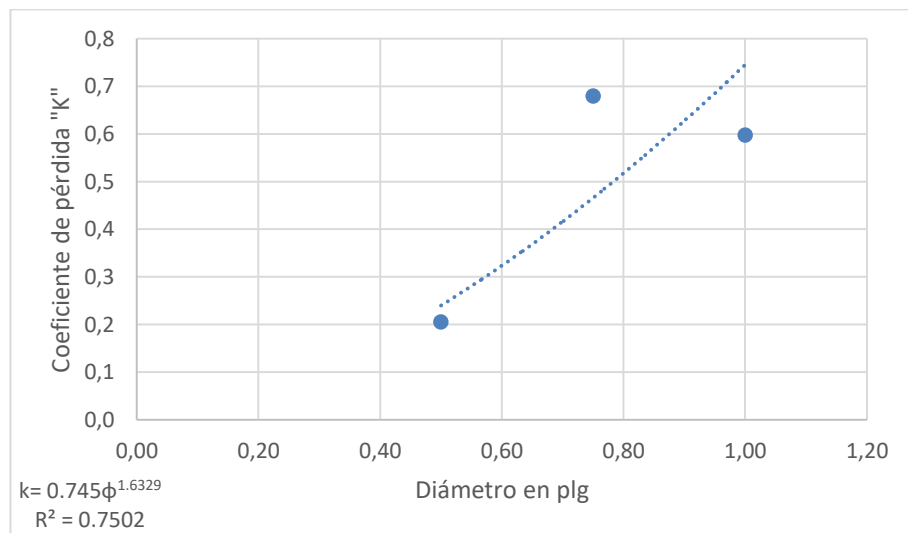
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

4.2.4. Discusión de resultados

Al graficar la relación que existe entre las variables de coeficiente de pérdida de energía (K) se observa que ninguna de las ecuaciones sigue la tendencia de; a mayor área en la sección de tubería menor coeficiente de descarga.

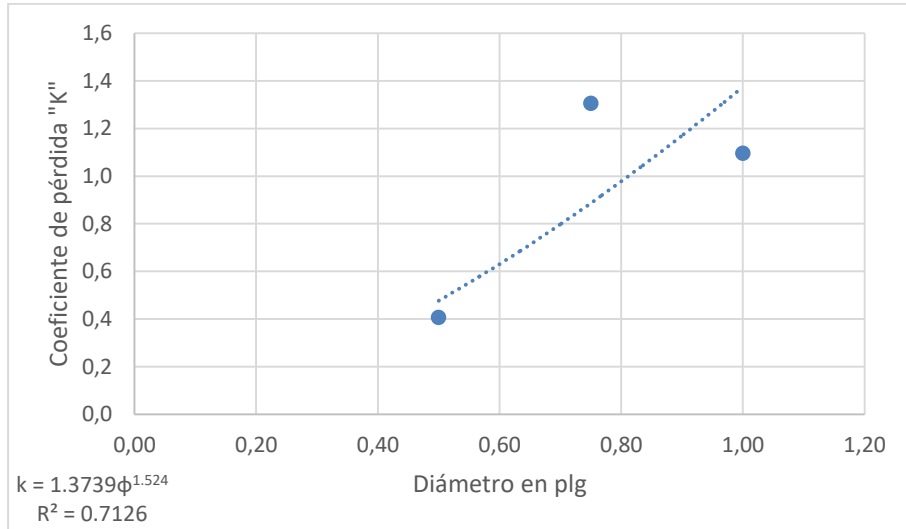
Las tuberías de diámetro 1" y ¾" siguen la proporción de aumentar el coeficiente de pérdida (K) conforme disminuye el área de la sección. Implica que ninguna de las ecuaciones empíricas evaluadas tiene la suficiente aproximación para considerar aceptables los resultados en tuberías de polietileno (P.E) de diámetros menores o iguales a ½".

Figura 52. Relación "K" y diámetro Cruciani-Margaritora



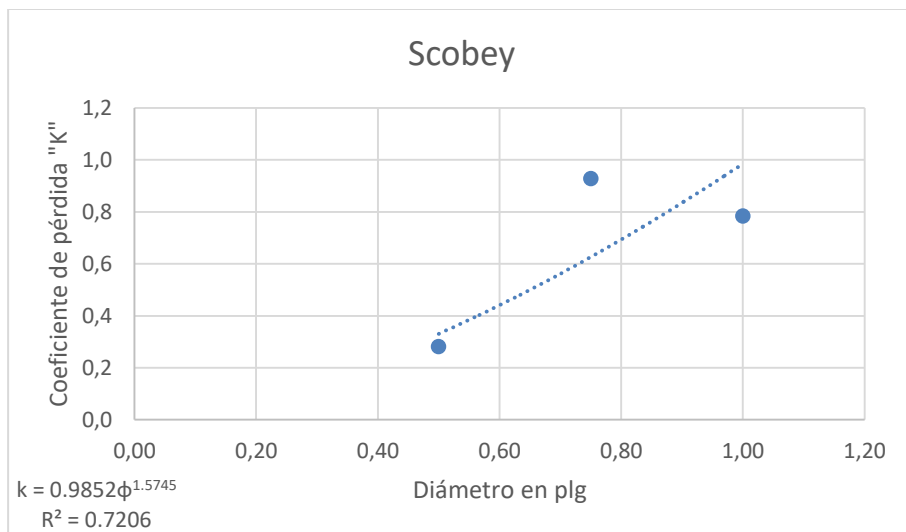
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 53. Relación "K" y diámetro Hazen-Williams



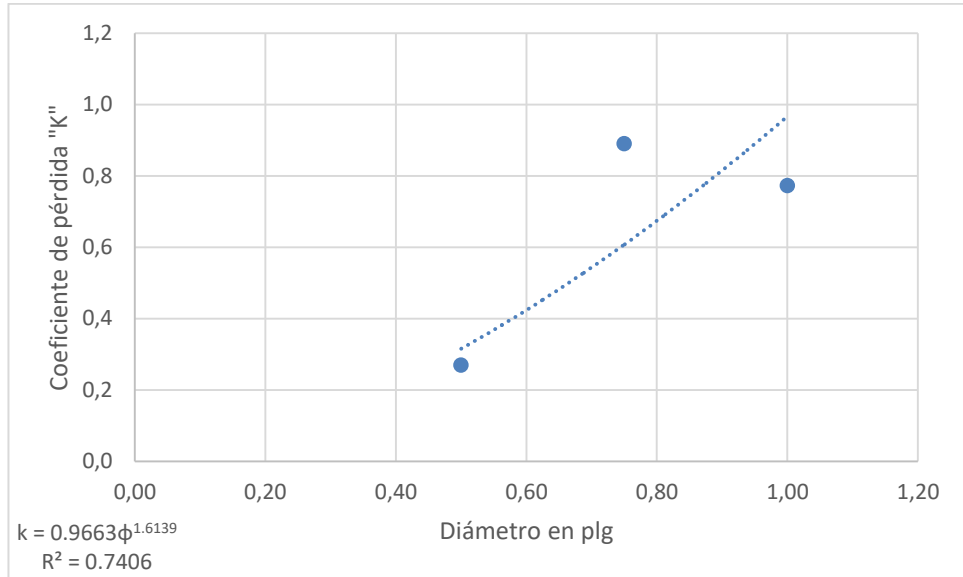
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 54. Relación "K" y diámetro Scobey



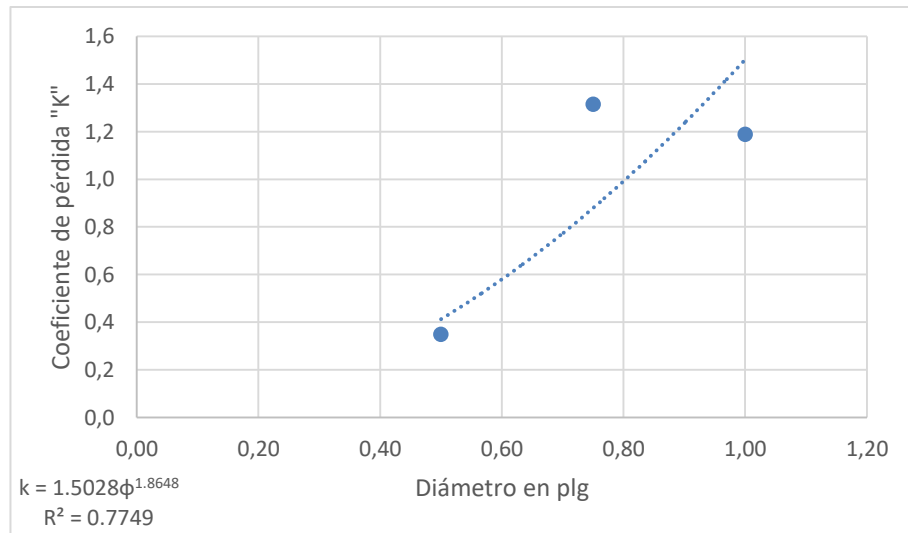
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 55. Relación "K" y diámetro Varonnes-Datei



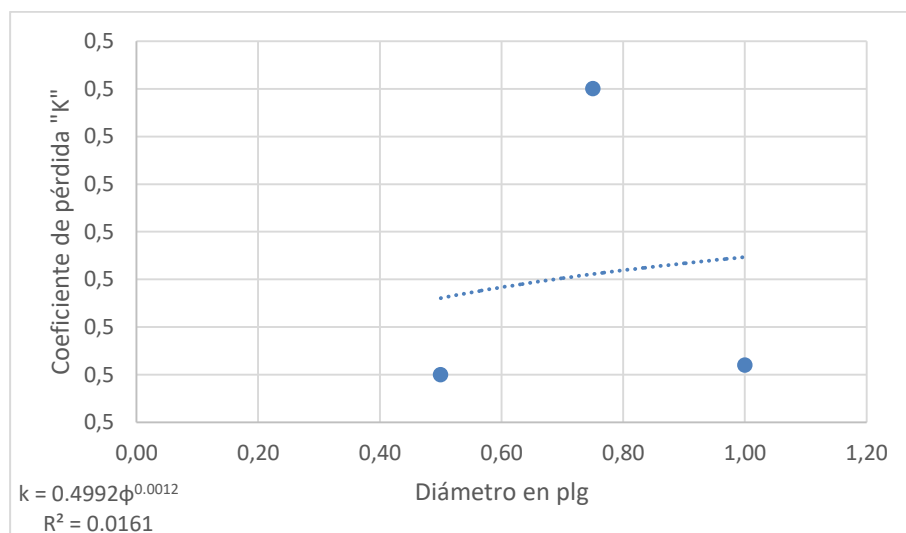
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 56. Relación "K" y diámetro Manning



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 57. Relación “K” y diámetro Darcy



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

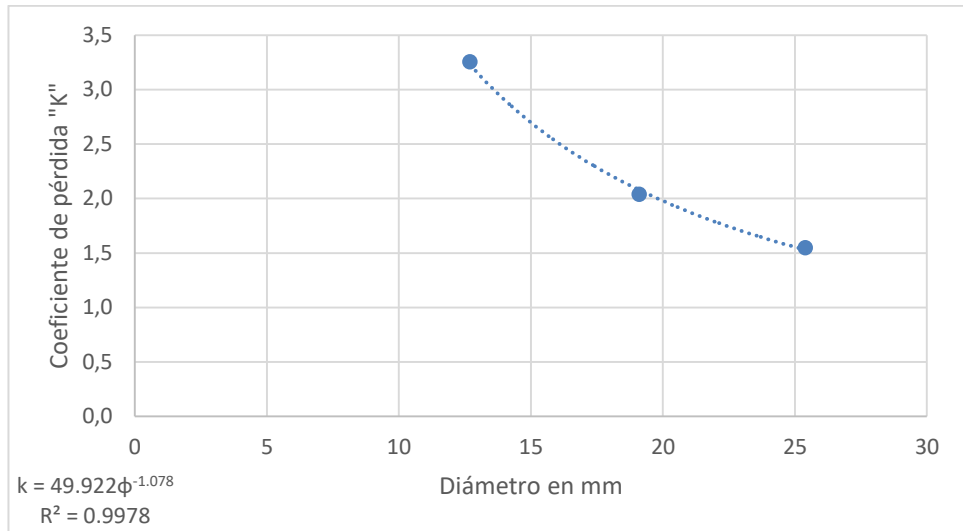
La correlación que existe entre el coeficiente de pérdida de energía y el diámetro de la tubería si se mantiene al medirlo de forma experimental, dando lugar a establecer una expresión general que incluya cualquier diámetro de tuberías de polietileno para la aproximación del coeficiente mencionado.

Tabla XXIII. Resumen de coeficientes de pérdida de ecuaciones empíricas

Núm.	Diámetro			Ko Experimental	K1 C-M	K2 H-W	K3 S	K4 V-D	K5 M	K6 D
	plg	Mm	cm							
1	1,00	25,4	2,54	1,5473	0,5975	1,0954	0,7832	0,7727	1,1878	0,4981
2	0,75	19,1	1,91	2,0377	0,679	1,3054	0,9273	0,8902	1,314	0,501
3	0,50	12,7	1,27	3,254	0,2054	0,4068	0,2811	0,2694	0,3492	0,498

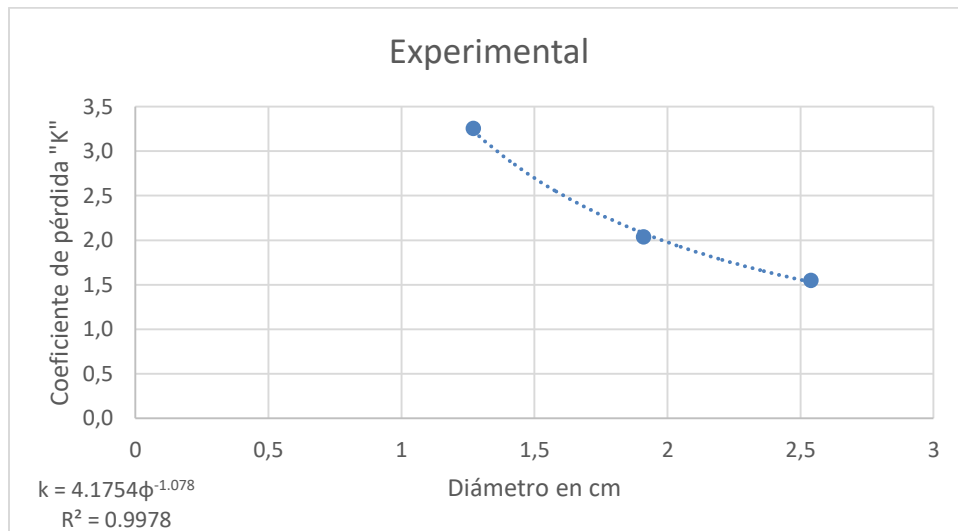
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 58. Relación "K" y diámetro experimental (mm)



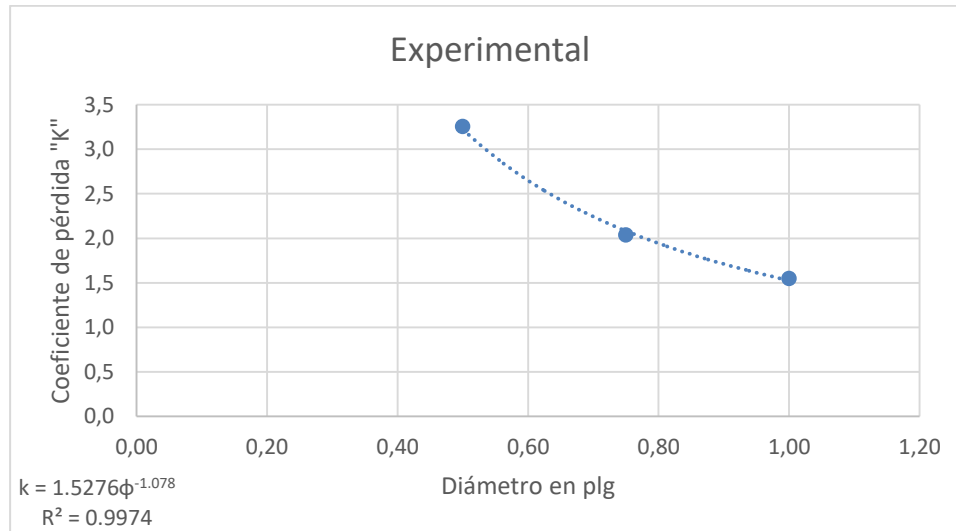
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 59. Relación "K" y diámetro experimental (cm)



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXIV. Relación “K” y diámetro experimental (plg)



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

En vista que los resultados experimentales siguen proporciones esperadas, se plantea utilizar el programa SPSS para modelar la ecuación general que incluya las variables que intervienen para la obtención de la pérdida de energía por fricción en tuberías,

$$h_f = k \frac{Q^m}{D^n} L$$

Donde:

hf= pérdida de energía por fricción en tuberías

k, m y n= constantes a determinar

L= longitud de la tubería

D= diámetro de la tubería

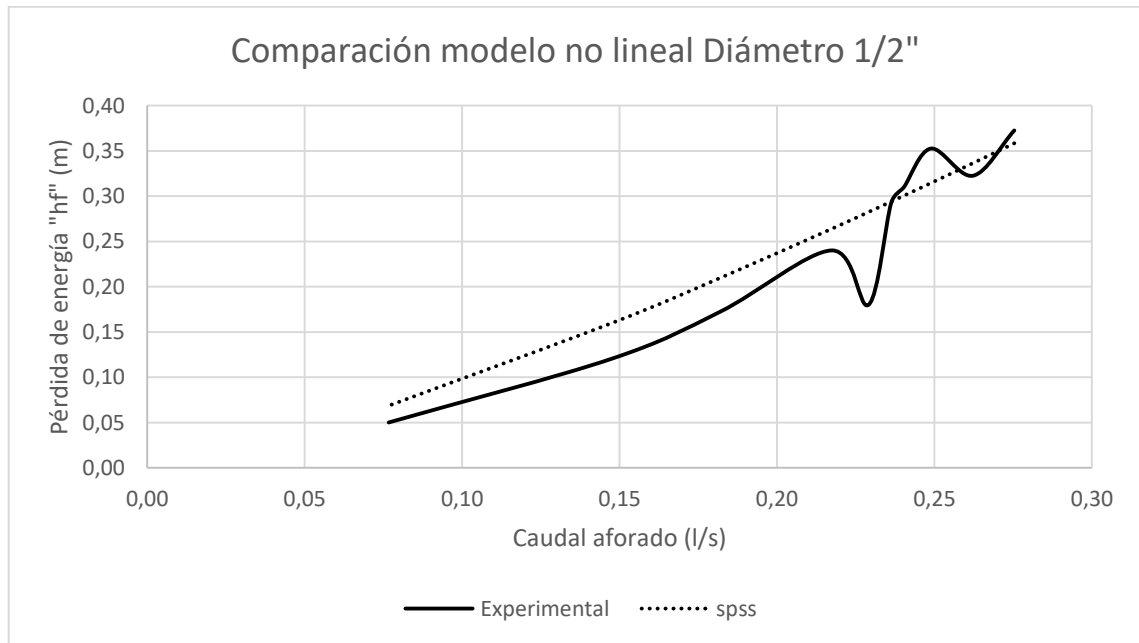
Tabla XXV. **Estimaciones de parámetros K, m y n**

Modelación SPSS

Parámetro	Estimación	Error estándar	Intervalo de confianza de 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	2,163E-05	,000	-3,051E-05	7,377E-05
m	1,294	,228	,827	1,762
n	2,356	,339	1,660	3,052

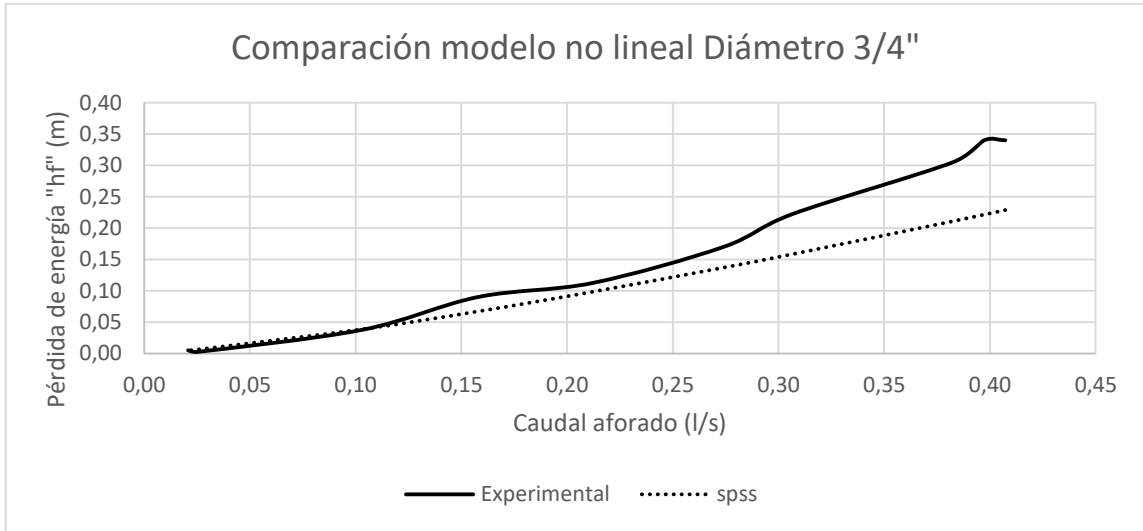
Fuente: elaboración propia, empleando SPSS.

Figura 60. **Comparación modelo no lineal diámetro 1/2"**



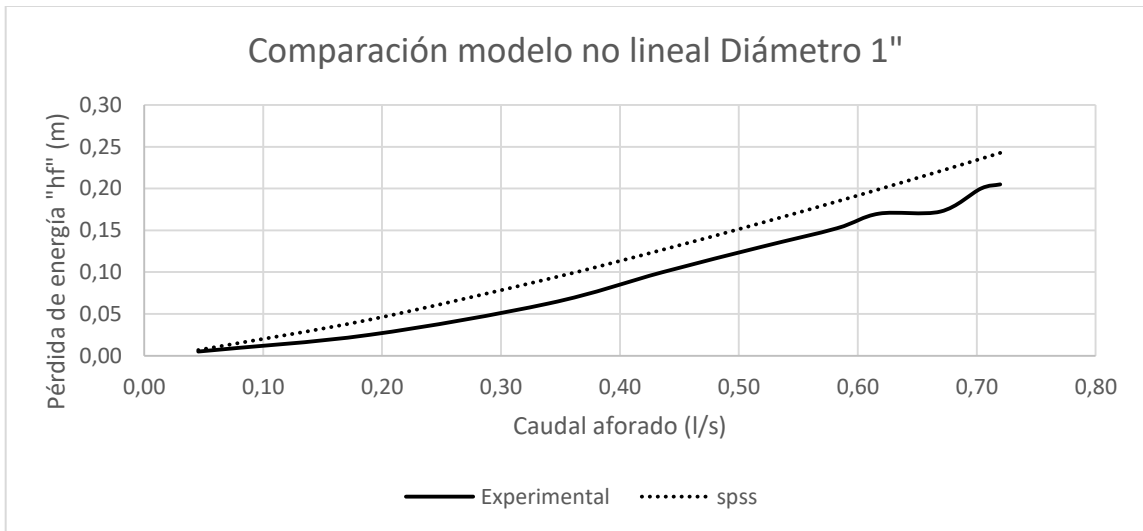
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 61. Comparación modelo no lineal diámetro de 3/4"



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 62. Comparación modelo no lineal diámetro 1"



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXVI. Resumen de modelación SPSS

Núm.	Diámetro	Longitud	Caudal	hf experimental	hf modelada	error porcentual medio
	m	m	l/s	M	m	
1	0,0127	3	0,2754	0,3725	0,36	0,001 %
2	0,0127	3	0,2623	0,3225	0,34	0,001 %
3	0,0127	3	0,2489	0,3525	0,31	0,004 %
4	0,0127	3	0,2403	0,3100	0,30	0,000 %
5	0,0127	3	0,2363	0,2925	0,29	0,000 %
6	0,0127	3	0,2291	0,1800	0,28	0,058 %
7	0,0127	3	0,2173	0,2400	0,26	0,002 %
8	0,0127	3	0,1821	0,1725	0,21	0,008 %
9	0,0127	3	0,1472	0,1200	0,16	0,013 %
10	0,0127	3	0,0767	0,0500	0,07	0,007 %
11	0,01905	3	0,4073	0,3400	0,23	0,036 %
12	0,01905	3	0,3973	0,3400	0,22	0,041 %
13	0,01905	3	0,3825	0,3050	0,21	0,029 %
14	0,01905	3	0,3067	0,2225	0,16	0,018 %
15	0,01905	3	0,2740	0,1700	0,14	0,006 %
16	0,01905	3	0,2122	0,1125	0,10	0,002 %
17	0,01905	3	0,1578	0,0900	0,07	0,006 %
18	0,01905	3	0,1028	0,0375	0,04	0,000 %
19	0,01905	3	0,0252	0,0025	0,01	0,006 %
20	0,01905	3	0,0207	0,0050	0,00	0,000 %
21	0,0254	3	0,7198	0,2050	0,24	0,007 %
22	0,0254	3	0,7036	0,2000	0,24	0,006 %
23	0,0254	3	0,6696	0,1725	0,22	0,014 %
24	0,0254	3	0,6178	0,1700	0,20	0,005 %
25	0,0254	3	0,5825	0,1525	0,18	0,007 %
26	0,0254	3	0,5183	0,1300	0,16	0,006 %
27	0,0254	3	0,4359	0,1000	0,13	0,007 %
28	0,0254	3	0,3400	0,0625	0,09	0,014 %
29	0,0254	3	0,1894	0,0250	0,04	0,013 %
30	0,0254	3	0,0454	0,0050	0,01	0,001 %

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

CONCLUSIONES

1. La determinación de la pérdida de energía por fricción en tuberías de polietileno de forma experimental evidencia el comportamiento esperado respecto a la longitud que recorre el flujo.
2. El comportamiento de la pérdida de energía por fricción en tramos de un metro no fue proporcional a los tramos de tres metros debido a que el flujo en tuberías de polietileno necesita desarrollarse en longitudes mayores de 100 centímetros para reflejar la misma cantidad de pérdida de energía descritas en ecuaciones empíricas de Cruciani Margaritora (C-M), Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Varonese-Datei (V-D), Manning (M) y Darcy (D).
3. En el resultado de la simulación hidráulica de los diámetros de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ " y 1"; pudo observarse que entre mayor es la sección transversal de la tubería, menor es la pérdida de energía y que el caudal y la pérdida de energía son directamente proporcional.
4. Las ecuaciones empíricas mencionadas en este trabajo de graduación como: Cruciani Margaritora (C-M), Hazen-Williams (H-W), Scobey (S), Varonese-Datei (V-D), Manning (M) y Darcy (D), no restringen su utilización al material de las tuberías, sino que, se basa en factores de fricción por rugosidad o el resultado del tipo de flujo con el criterio del número de Reynolds y son funcionales.

5. Como resultado de la comparación de las ecuaciones empíricas utilizadas se obtuvo gráficamente los coeficientes de pérdida “k” que muestran la proporción en la que debe afectarse para aproximar al valor real obtenido en la simulación hidráulica con los valores obtenidos en la tabla XXIII.

6. Se obtuvo la ecuación general $h_f = \frac{KQ^m L}{D^n}$, en donde la estimación del parámetro K es de 2,163E-05, m de 1,294 y n de 2,356, según lo muestra la tabla XXV. Estos parámetros proporcionan un intervalo de confianza del 95 %.

RECOMENDACIONES

4. Para ecuaciones como Hazen-Williams, Blasius, Manning y Varonese-Datei; es necesario, previamente, obtener factores de fricción que brinden propiedades sobre rugosidades relativas o absolutas a través de ecuaciones o tablas, debido a la facilidad y simplicidad se recomienda la ecuación del factor “f” de Blasius.
5. Para la utilización de cualquiera de las ecuaciones descritas en este trabajo de graduación se considera necesario utilizar el coeficiente de pérdida de energía (k) para mejorar la aproximación en el diseño hidráulico.
6. Utilizar alternativamente la ecuación general obtenida de la regresión no lineal $h_f = \frac{Q^{yy}L}{D^{zz}}$ en proyectos de sistema de riego en plantaciones.
7. Utilizando diámetros diferentes al de este trabajo de graduación y mismo material de tubería, es posible ampliar y someter a prueba la ecuación propuesta.

BIBLIOGRAFÍA

1. GILES, Ronald V. *Mecánica de Fluidos e Hidráulica*. México: McGraw Hill. 273 p.
2. MARTÍNEZ CAÑADAS, Miguel Ángel. *Hidráulica Aplicada a Proyectos de Riego*. Murcia, España: Universidad, Secretariado de Publicaciones, 1993. 312 p
3. MAYOL MALLORQUÍ, José M. *Tuberías, Materiales, Cálculos Hidráulicos y Cálculos Mecánicos Tomo I.* Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados (ETA), 1981. 393 p
4. MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*, 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 627 p
5. RODRÍGUEZ DÍAZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica Experimental*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1990-2000. 337 p
6. SIMÓN, L Andrew. *Hidráulica Básica*. Estados Unidos: Limusa, 1992. 232 p
7. SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica General*. México: Limusa, 1990. 559 p
8. STREETER, Víctor L. y Benjamín Wyke. *Mecánica de los Fluidos*. México: McGraw-Hill, 1999. 747 p

