

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS POLIMÉRICAS PARA INSTALACIONES HIDROSANITARIAS MEDIANTE MODELOS EMPÍRICOS

Flores H.a, Maiz, M.a, Condori, E.<sup>b</sup>

- a. Docente de la Facultad de ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [haydeeflo6@gmail.com](mailto:haydeeflo6@gmail.com)
- b. Estudiante de pregrado de la Facultad de ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [michasljhosep@gmail.com](mailto:michasljhosep@gmail.com)
- c. Estudiante de pregrado de la Facultad de ingeniería Civil USFX. Destacamento 317, Ex campus REFISUR, 573, Sucre. Bolivia. [bcjune.2000@gmail.com](mailto:bcjune.2000@gmail.com)

Recibido: 01/10/2025    Aceptado:    Publicado:

## RESUMEN

---

Este estudio tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo de las pérdidas de carga lineales y locales en tres diferentes tuberías poliméricas: policloruro de vinilo (PVC), polipropileno random (PPR) y polietileno reticulado (PEX). La investigación se basó en la aplicación de modelos empíricos, haciendo uso de las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning. Los cálculos fueron complementados con simulaciones en EPANET que evaluó el comportamiento hidráulico dentro de un esquema representativo de red domiciliaria, permitiendo una cuantificación integral de las pérdidas. Los resultados evidenciaron diferencias en el desempeño de los materiales. Las tuberías de PEX demostraron ser las más eficientes, registrando las menores pérdidas de carga y un comportamiento más estable. Por otro lado, el PVC presentó las mayores pérdidas y una mayor variabilidad, mientras que el PPR mostró valores intermedios. En cuanto a las pérdidas locales, los accesorios tes fueron identificados como los más críticos. Se concluye que, bajo las condiciones evaluadas y considerando los tres modelos empíricos, la tubería de PEX se clasifica como la opción más eficiente para obtener menores pérdidas de carga en instalaciones hidrosanitarias. Los resultados proporcionan un antecedente cuantitativo valioso para apoyar la toma de decisiones de proyectistas.

---

**Palabras clave:** Pérdida de carga, tuberías poliméricas, Epanet, instalaciones hidrosanitarias.

## ABSTRACT

---

The objective of this study was to perform a comparative analysis of linear and local head losses in three different polymer pipes: polyvinyl chloride (PVC), random polypropylene (PPR), and cross-linked polyethylene (PEX). The research was based on the application of empirical models, using the Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, and Manning equations. The calculations were complemented by simulations in EPANET, which evaluated the hydraulic behavior within a representative residential network scheme, allowing for a comprehensive quantification of the losses. The results showed differences in the performance of the materials. PEX pipes proved to be the most efficient, recording the lowest head losses and more stable behavior. On the other hand, PVC showed the highest losses and greater variability, while PPR showed intermediate values. In terms of local losses, tee fittings were identified as the most critical. It is concluded that, under the conditions evaluated and considering the three empirical models, PEX piping is classified as the most efficient option for obtaining lower pressure losses in water and sanitation installations. The results provide valuable quantitative background information to support designers' decision-making.

---

**Keywords:** Pressure drops, polymer pipes, Epanet, Plumbing installations.

## INTRODUCCIÓN

Las tuberías poliméricas como policloruro de vinilo (PVC), polipropileno random (PPR) y polietileno reticulado (PEX) son ampliamente utilizadas en instalaciones hidrosanitarias dentro de nuestro entorno debido a su resistencia a la corrosión, peso ligero y facilidad de instalación (Simina et al., 2023). Sin embargo, resulta esencial cuantificar las pérdidas de energía de primer y segundo orden generadas por los materiales en sistemas de agua potable para viviendas y edificaciones.

La estimación de las pérdidas de carga por fricción en tuberías constituye un aspecto fundamental para las aplicaciones de ingeniería, particularmente en el diseño hidráulico y el análisis de redes de distribución de agua, porque se necesita garantizar la eficiencia y funcionalidad de los sistemas. (Castillo et al., 2018)

El software EPANET integra tres modelos empíricos ampliamente reconocidos para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías: Hazen-Williams (HW), Darcy-Weisbach (DW) y Chezy-Manning (CM) (Vegas et al., 2018). Si bien presentan variaciones en los coeficientes de rugosidad y están sujetos a normativas nacionales, su aplicación en instalaciones hidrosanitarias requiere considerar los rangos de validez y limitaciones específicas de cada ecuación para unos resultados precisos.

Para las pérdidas locales, el método de longitudes equivalentes evalúa las pérdidas localizadas en accesorios de sistemas de agua a presión. Aunque los coeficientes de pérdidas locales pueden variar según el material, esta metodología incorpora las longitudes equivalentes a la longitud real de la tubería, facilitando el cálculo de pérdidas totales mediante su tratamiento como pérdidas exclusivas por fricción. (Guaycochea, 1995)

La ecuación de Darcy Weisbach, que relaciona longitud, velocidad y material propuesta por

Julius Weisbach (1806-1871) es la siguiente. (Brown, 2002)

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

$h_f$ : Pérdida por fricción (m)  
 $f$ : coeficiente de fricción, adimensional  
 $L$ : Longitud del tramo de tubería (m)  
 $D$ : Diámetro interior de la tubería (m)  
 $V$ : Velocidad del flujo  
 $g$ : Gravedad de la tierra (9.81m/s<sup>2</sup>)

Osborne Reynolds (1842-1912) estableció mediante experimentos el número adimensional que lleva su nombre para clasificar los regímenes de flujo.

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (2)$$

Re: Número de Reynolds (adimensional)  
 $V$ : Velocidad del flujo (m/s)  
 $D$ : Diámetro del conducto (m)  
 $\nu$ : Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)  
 Consideraremos un flujo turbulento

Tipos de flujos:

Flujo laminar:  $Re < 2300$   
 Flujo de transición:  $2300 < Re < 4000$   
 Flujo turbulento:  $Re > 4000$

White (1939) estableció que el factor de fricción en tuberías comerciales en la región de transición puede modelarse mediante la ecuación (3) considerando régimen turbulento. (Brown, 2002)

$$f = \frac{0.25}{[\log(\frac{\epsilon}{3.71 * D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}})]^2} \quad (3)$$

$f$ : coeficiente de fricción, adimensional  
 $\epsilon$ : Rugosidad absoluta del material (mm)  
 $D$ : Diámetro interior de la tubería (m)  
 $Re$ : Número de Reynolds (adimensional)

Se emplearán los siguientes valores de rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ) en mm para cada

material, según fichas técnicas de tuberías poliméricas de la empresa Tigre:

PVC	PPR	PEX
0.0015	0.003	0.004

**Tabla 1:** Rugosidad absoluta para Tuberías polimérica.

La ecuación de Hazen-Williams permite calcular pérdidas de energía por fricción en tuberías mediante un coeficiente empírico  $C_H$ , que depende de la rugosidad y el material de la tubería, ofreciendo una solución práctica, pero con limitaciones en precisión frente a modelos teóricos. (Gavilánez, 2020)

$$h_f = \frac{10.67 * L * Q^{1.85}}{D^{4.87} * C^{1.85}} \quad (4)$$

$h_f$ : Pérdida por fricción (m)  
 $C_{HW}$ : coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 L: Longitud del tramo de tubería (m)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)  
 Q: Caudal o demanda ( $m^3/Sg$ ) (Guaycochea, 1995)

Coefficientes de rugosidad de Hazen Williams ( $C_{HW}$ ), según fichas técnicas de tuberías poliméricas de la empresa Tigre:

PVC	PPR	PEX
140-150	150	130-140

**Tabla 2:** coeficiente de rugosidad, (HW).

La ecuación de Manning, propuesta en 1890 para canales abiertos, se adaptó para calcular pérdidas de carga considerando la pendiente de la línea de energía ( $h_f/L$ ) en tuberías lisas de polietileno con diámetros y gastos reducidos, considerando régimen turbulento.

$$h_f = \frac{10.2936 * n^2 * L * Q^2}{D^3} \quad (5)$$

$h_f$ : Pérdida por fricción (m)  
 n: coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 L: Longitud del tramo de tubería (m)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)  
 Q: Caudal o demanda ( $m^3/Sg$ )

PVC	PPR	PEX
0.010	0.008	0.007-0.009

**Tabla 3:** Coeficiente de rugosidad n, (CH).

Para determinar las pérdidas locales en accesorios de tuberías, se utiliza una ecuación basada exclusivamente en la geometría del elemento.

$$h_L = K * \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

K: Constante de perdida local (adimensional)  
 V: Velocidad del flujo (m/s)  
 g: Gravedad de la tierra ( $9.81m/s^2$ )

A partir de la igualdad  $h_L=h_f$  entre las ecuaciones (1), (4) y (5), se derivaron las longitudes equivalentes para diferentes accesorios, considerando su geometría como el material de la tubería (Guaycochea, 1995).

Para Darcy Weisbach:

$$L_e = \frac{9.1 * k * D^{1.25}}{\left(\frac{\varepsilon + 0.034}{1000}\right)^{0.25}} \quad (7)$$

$L_e$ : Longitud equivalente por accesorio (m)  
 K: Constante de perdidas locales  
 $\varepsilon$ : Rugosidad absoluta del material (mm)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)

Para Hazen Williams:

$$L_e = 0.0083 * k * C^{1.85} * D^{1.15} \quad (8)$$

$L_e$ : Longitud equivalente por accesorio (m)  
 K: Constante de perdidas locales

$C_{HW}$ : coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)

Para Manning:

$$L_e = \frac{0.008027 * K * D^3}{n^2} \quad (9)$$

$L_e$ : Longitud equivalente por accesorio (m)

K: Constante de perdidas locales  
 n: coeficiente de rugosidad (adimensional)  
 D: Diámetro interior de la tubería (m)

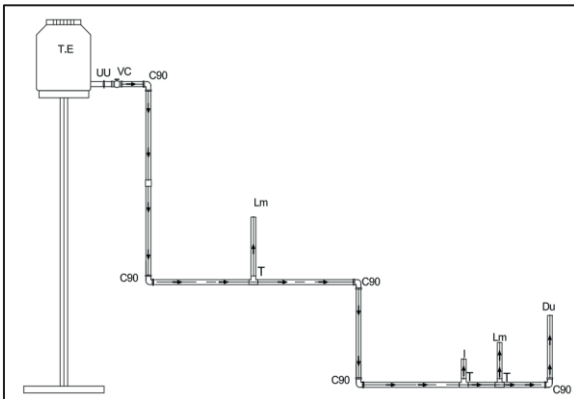
Con estos valores se incorporará la longitud equivalente a la longitud real.

$$L = L_R + L_e \quad (10)$$

L: Longitud total (m)  
 $L_R$ : Longitud real (m)  
 $L_e$ : Longitud equivalente (m)

**MATERIALES Y METODOS**

El caso de estudio esta especificado en evaluar las pérdidas de carga primarias y secundarias en tuberías poliméricas (PVC, PPR y PEX) mediante la aplicación de tres modelos empíricos; Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning. El análisis se implementó en un esquema representativo de red hidrosanitaria, utilizando el software EPANET para simular integralmente el comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones operativas reales.



**Fig. 1** Esquema de red

Para estimar los caudales usamos el método de Hunter teniendo 3 tipos de artefactos sanitarios más típicos (Inodoro, lava manos y ducha).

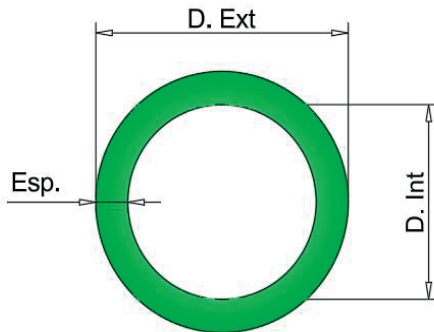
Art. Sanitario	Simbología	U. G agua fría
Inodoro	I	2.5
Lava manos	Lm	1
Ducha	Du	1.5

**Tabla 4.** Unidades de gasto por artefacto sanitario, método Hunter, (RENISDA, 2011). Se utilizarán las constantes de pérdida local para los accesorios en el esquema de la red hidrosanitaria, en base a fichas técnicas de los catálogos de la empresa Tigre.

Accesorio	K(PVC)	K(PPR)	K(PEX)
Codo de 90°	0.4	1.5	0.37
Tee, Q divergente	1.8	1.8	0.1
Válvula compuerta	0.2	0.2	0.2
Unión Universal I	0.3	0.25	1

**Tabla 5.** Constantes de perdidas locales.

Entre los diámetros comerciales se emplearon de 1/2" y 1" con la variación de los espesores a partir del tipo de tubería.



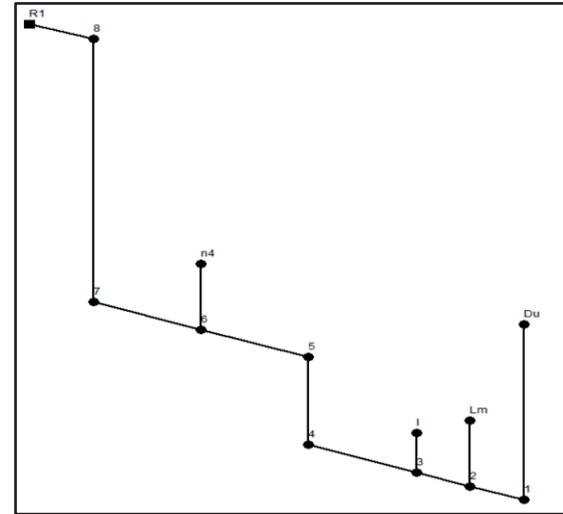
**Fig.2** Diámetro interior y exterior de tuberías poliméricas

D (in)	PVC (mm)	PPR (mm)	PEX (mm)
1/2in	15	16.2	16
1in	20	20.4	20

**Tabla 6.** Diámetro interior de tuberías poliméricas.

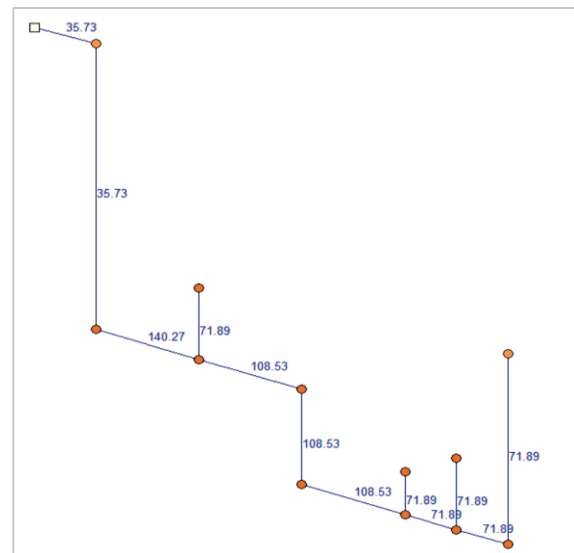
**MODELO NUMÉRICO**

Se desarrolló un modelo numérico utilizando el software EPANET, considerando que la presión mínima en el artefacto más desfavorable debe ser de 2 m.c.a. Para ello, se modeló todo el esquema hidrosanitario aplicando las 3 ecuaciones, teniendo en cuenta las longitudes equivalentes, los diámetros comerciales y la rugosidad específica de cada material.



**Fig.3** Modelo numérico Epanet.

Para el análisis del primer modelo de tuberías PVC se obtuvieron los siguientes resultados donde la pérdida de carga se expresa de una pérdida unitaria m/km.



**Fig.4** Pérdidas de energía unitaria, tubería PVC, (Darcy-Weisbach).

El software EPANET proporciona las pérdidas unitarias, las cuales se emplearon para calcular la pérdida de carga total por tramo mediante la siguiente ecuación:

$$H_f = P_u * L \quad (11)$$

$P_u$ : Pérdida unitaria (m/km)

$L$ : Longitud de cada tramo (km)

Se determinan las pérdidas de energía totales para los tres materiales de tubería (PVC, PPR y PEX) mediante la aplicación comparativa de las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning.

**RESULTADOS Y DISCUSION**

**Calculo longitudes equivalentes**

Se determinaron las longitudes equivalentes para cuatro tipos de accesorios en cada material polimérico mediante la aplicación de las ecuaciones (7), (8) y (9).

Resultados:

Accesorio	Le (PVC)	Le (PPR)	Le (PEX)
Codo de 90	0.25	0.67	0.24
Tee	1.11	1.21	0.07
Válvula compuerta	0.12	0.14	0.13
Unión universal	0.185	0.17	0.66

**Tabla 7.** Longitudes equivalentes (Darcy)

Accesorio	Le (PVC)	Le (PPR)	Le (PEX)
Codo de 90	0.28	1.14	0.22
Tee	1.27	1.36	0.06
Válvula compuerta	0.14	0.15	0.12
Unión universal	0.21	0.19	0.58

**Tabla 8.** Longitudes equivalentes (Hazen)

Accesorio	Le (PVC)	Le (PPR)	Le (PEX)
-----------	----------	----------	----------

Codo de 90	0.12	0.46	0.17
Tee	0.53	0.84	0.05
Válvula compuerta	0.06	0.09	0.09
Unión universal	0.09	0.12	0.46

**Tabla 9.** Longitudes equivalentes (Manning)

El análisis de las Tablas 7, 8 y 9, correspondientes a las longitudes equivalentes calculadas mediante Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning, revela que el valor máximo se presenta en las tes de PPR, seguidas por las de PVC. Este comportamiento puede atribuirse al efecto de divergencia del flujo en estos accesorios, donde la derivación lateral comprime el flujo principal, generando un incremento abrupto en la velocidad aguas abajo y consecuentemente mayores pérdidas de energía (Liu et al., 2021). Los resultados son consistentes en los tres modelos empleados, confirmando la criticidad de estos elementos en el diseño hidráulico.

**Cálculo de pérdidas totales utilizando Darcy-Weisbach**

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	f	H <sub>f</sub> (m)
R1_8	0.94	35.73	0.029	0.034
8_7	5.30	35.73	0.029	0.189
7_6	1	140.27	0.027	0.140
6_5	1	108.53	0.028	0.109
5_4	1.25	108.53	0.028	0.136
4_3	2.36	108.53	0.028	0.256
3_2	1.61	71.89	0.029	0.116
2_1	0.5	71.89	0.029	0.036
1_Du	2.25	71.23	0.029	0.160

**Tabla 10.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PVC, (Darcy).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	f	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.9	32.7	0.029	0.029
8_7	5.34	32.7	0.029	0.175
7_6	1	98	0.027	0.098
6_5	1	75.8	0.028	0.076
5_4	1.27	75.8	0.028	0.096
4_3	2.48	75.8	0.028	0.188
3_2	1.71	50.19	0.03	0.086
2_1	0.5	50.19	0.03	0.025
1_Du	2.27	47.35	0.03	0.107

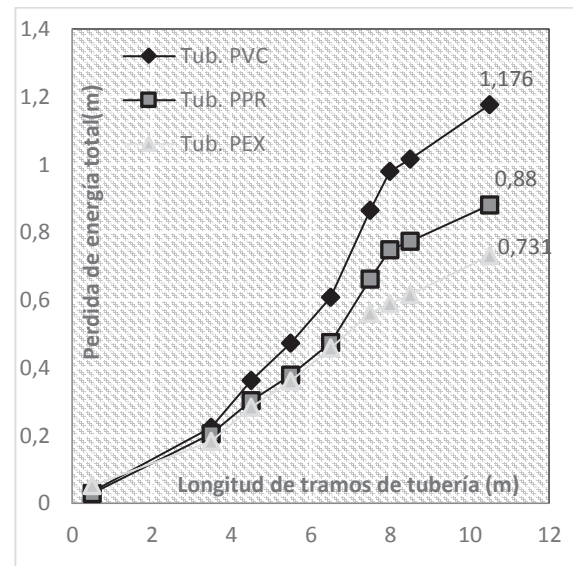
**Tabla 11.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PPR, (Darcy).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	f	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	1.5	34.84	0.028	0.052
8_7	3.73	34.84	0.028	0.130
7_6	1	101.18	0.027	0.101
6_5	1	78.14	0.027	0.078
5_4	1.24	78.14	0.027	0.097
4_3	1.31	78.14	0.027	0.102
3_2	0.57	51.62	0.029	0.029
2_1	0.5	51.62	0.029	0.026
1_Du	2.24	51.62	0.029	0.116

**Tabla 12.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PEX, (Darcy).

Las Tablas 10, 11 y 12 presentan los resultados de las simulaciones en EPANET utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach para los sistemas de PVC, PPR y PEX respectivamente. Cada tabla incluye: la longitud total del tramo (que incorpora las longitudes equivalentes de los

accesorios), la pérdida unitaria, el factor de fricción y la pérdida de energía total calculada.



**Fig.5** pérdidas de carga totales para los 3 materiales usando Darcy-Weisbach.

La figura 5 muestra las pérdidas acumuladas calculadas en el sistema de red con Darcy-Weisbach. El PVC registró la mayor pérdida (1.176 m) en el punto crítico, mientras PPR y PEX presentaron valores menores de 0.88m y 0.73 respectivamente.

**Cálculo de pérdidas totales utilizando Hazen-Williams**

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	C	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.99	31.6	150	0.031
8_7	6.55	31.61	150	0.207
7_6	1	128.33	150	0.128
6_5	1	97.82	150	0.098
5_4	2.28	97.82	150	0.223
4_3	2.55	97.82	150	0.249
3_2	1.77	63.14	150	0.112
2_1	0.5	63.14	150	0.032

1_Du	2.28	63.14	150	0.144
------	------	-------	-----	-------

**Tabla 13.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PVC, (Hazen).

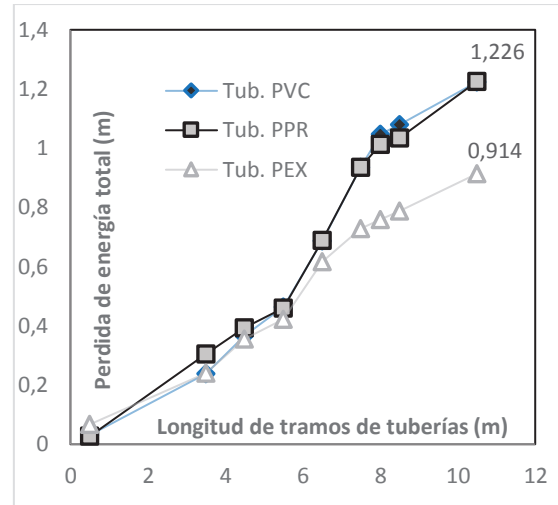
Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	C	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.94	28.7	150	0.027
8_7	9.68	28.7	150	0.278
7_6	1	88.21	150	0.088
6_5	1	67.24	150	0.067
5_4	3.41	67.24	150	0.229
4_3	3.67	67.24	150	0.247
3_2	1.77	43.4	150	0.077
2_1	0.5	43.4	150	0.022
1_Du	4.41	43.4	150	0.191

**Tabla 14.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PPR, (Hazen).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	C	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	1.78	37.41	130	0.067
8_7	4.63	37.41	130	0.173
7_6	1	114.98	130	0.115
6_5	1	87.64	130	0.067
5_4	2.22	87.64	130	0.195
4_3	1.27	87.64	130	0.111
3_2	0.56	56.57	130	0.032
2_1	0.5	56.57	130	0.028
1_Du	2.22	56.57	130	0.126

**Tabla 15.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PEX, (Hazen).

Las Tablas 13, 14 y 15 presentan los resultados de las simulaciones realizadas en EPANET mediante la aplicación de la ecuación de Hazen Williams para los sistemas de tuberías de PVC, PPR y PEX, respectivamente.



**Fig. 6** pérdidas de carga totales para los 3 materiales usando Hazen-Williams.

El análisis mediante la ecuación de Hazen-Williams, considerando los coeficientes de rugosidad específicos de cada material, determinó que las mayores pérdidas de energía en el punto más desfavorable corresponden a PVC y PPR, registrando valores coincidentes de 2.226 m. En contraste, el sistema con tubería PEX presentó la menor pérdida de energía, con un valor de 0.914 m.

**Cálculo de pérdidas totales utilizando Manning**

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	n	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.59	56.96	0.01	0.034
8_7	5.13	56.96	0.01	0.292
7_6	1	264.18	0.01	0.264
6_5	1	197.04	0.01	0.197
5_4	2.12	197.04	0.01	0.418
4_3	1.65	197.04	0.01	0.325

3_2	1.03	122.81	0.01	0.126
2_1	0.5	122.81	0.01	0.061
1_Du	2.12	122.81	0.01	0.260

**Tabla 16.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PVC, (Manning).

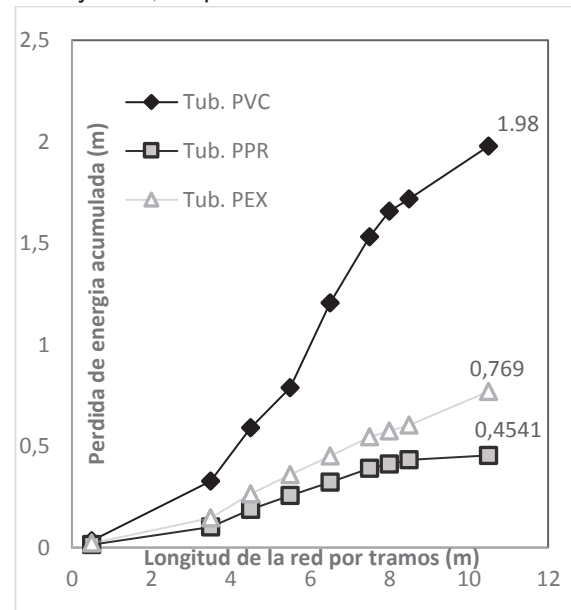
Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	n	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.64	32.800	0.008	0.021
8_7	8	32.800	0.008	0.262
7_6	1	112.160	0.008	0.112
6_5	1	83.660	0.008	0.084
5_4	2.93	83.660	0.008	0.245
4_3	2.76	83.660	0.008	0.231
3_2	1.34	52.140	0.008	0.070
2_1	0.5	52.140	0.008	0.026
1_Du	2.93	52.140	0.008	0.153

**Tabla 17.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PPR, (Manning).

Link ID	L (m)	P <sub>u</sub> (m/km)	n	H <sub>f</sub> (m)
R1-8	0.64	36.46	0.008	0.023
8_7	4.57	36.46	0.008	0.016
7_6	1	119.84	0.008	0.120
6_5	1	89.39	0.008	0.089
5_4	2.17	89.39	0.008	0.194
4_3	1.22	89.39	0.008	0.109
3_2	0.55	55.71	0.008	0.031
2_1	0.5	55.71	0.008	0.028
1_Du	2.17	55.71	0.008	0.121

**Tabla 18.** Pérdidas de carga totales, para el sistema de red con tuberías PEX, (Manning).

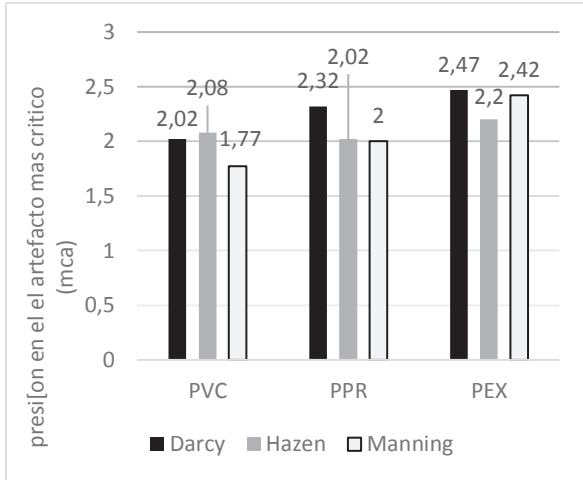
Las Tablas 16, 17 y 18 recopilan los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en EPANET aplicando la ecuación de Manning para modelar el comportamiento hidráulico de los sistemas conformados por tuberías de PVC, PPR y PEX, respectivamente.



**Fig.7** pérdidas de carga totales para los 3 materiales usando Manning.

La Figura 7 compara las pérdidas de carga totales calculadas con la ecuación de Manning para los tres materiales. Los resultados muestran que el PVC presenta la mayor pérdida (1.98 m), seguido del PPR (0.769 m), mientras que el PEX registra el valor más bajo (0.45 m).

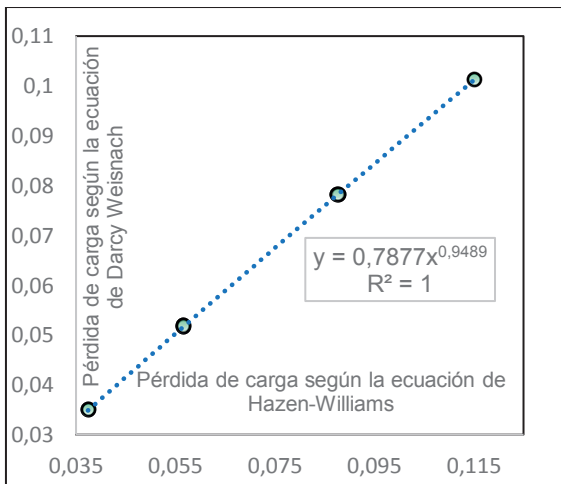
### Análisis de presiones



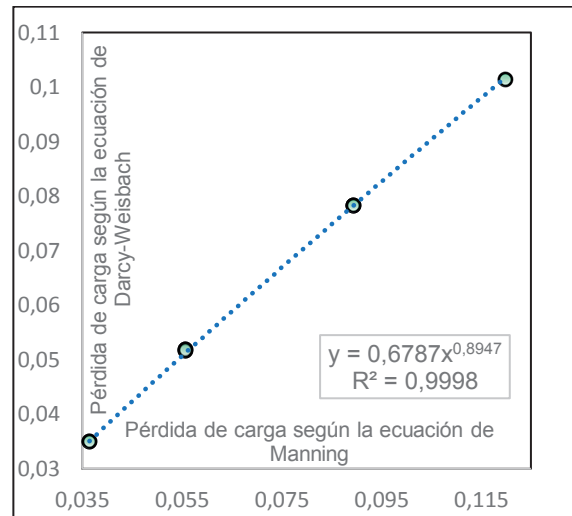
**Fig.8** La presión obtenida en el artefacto más desfavorable

El análisis de presión en el punto crítico (una ducha) del sistema hidrosanitario revela que, para las tres ecuaciones empíricas, la tubería de polietileno reticulado (PEX) registró las mayores presiones: 2.47 mca con Darcy-Weisbach, 2.2 mca con Hazen-Williams y 2.42 mca con Manning. Estos resultados confirman el superior desempeño hidráulico del PEX en condiciones operativas reales.

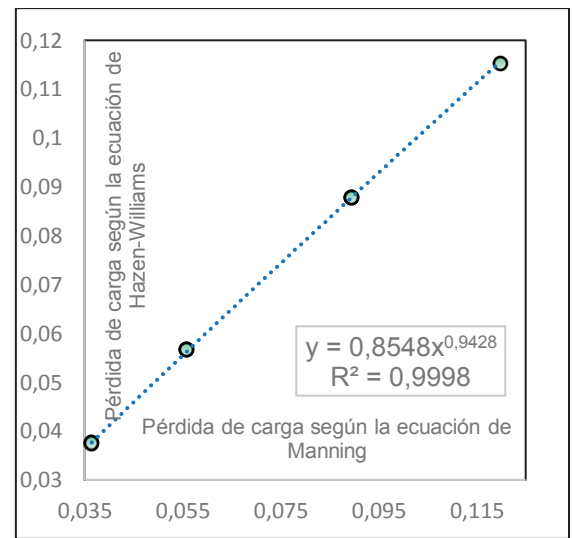
Se cuantificó el grado de correlación entre las tres ecuaciones empíricas aplicadas al polietileno reticulado (PEX) mediante análisis estadístico de las pérdidas de carga por tramo.



**Fig.9** La pérdida de carga expresada en metros de longitud de tubería a lo largo de ambos ejes.



**Fig.10** La pérdida de carga expresada en metros de longitud de tubería a lo largo de ambos ejes.



**Fig.11** La pérdida de carga expresada en metros de longitud de tubería a lo largo de ambos ejes.

A partir de las gráficas 9,10 y 11, donde se obtuvo las siguientes correlaciones:

- Darcy Welsbach vs. Hazen Williams: R=1
- Darcy Welsbach vs. Manning: R=0.9998
- Hazen Williams vs. Manning: R=0.9998

Los coeficientes de correlación ( $R > 0.9$ ) evidencian una alta consistencia entre los modelos empíricos al evaluar pérdidas de carga en tuberías de polietileno reticulado (PEX), validando la confiabilidad de los resultados.

La tendencia de que el material influye en las pérdidas de carga se explica por las variaciones en la rugosidad interna de cada material que condiciona la fricción y por ende la disipación de energía.

El comportamiento de la presión en el punto más desfavorable reafirma que el PEX tiene valores óptimos que indica una mejor estabilidad del sistema y una menor pérdida en condiciones de uso real.

## CONCLUSIONES

A partir del análisis comparativo y la modelación numérica en EPANET de las pérdidas de carga en tuberías poliméricas, se han extraído las siguientes conclusiones fundamentales:

Se determinó cuantitativamente que la tubería de Policloruro de Vinilo (PVC) presenta las mayores pérdidas de carga totales en el sistema, que son atribuibles tanto a la fricción lineal como a las pérdidas locales en accesorios. Este material exhibió una menor eficiencia hidráulica entre las opciones evaluadas.

La tubería de Polietileno Reticulado (PEX) se posicionó como la opción más eficiente desde el punto de vista hidráulico, registrando de manera consistente las menores pérdidas de carga en los tres modelos empíricos utilizados. Su rendimiento superior la posiciona como la alternativa óptima para la minimización de pérdidas energéticas en instalaciones hidrosanitarias.

El Polipropileno Random (PPR) mostró un comportamiento intermedio, con valores de pérdida de carga que se sitúan consistentemente entre los del PVC y el PEX.

Los porcentajes promedio de diferencia en pérdidas de energía, considerando los tres modelos empíricos, indican que el PEX presenta una reducción del 46.7% respecto al PVC y del 27.8% si se compara con el PPR, dando a notar su eficiencia hidráulica superior.

El análisis de pérdidas locales identificó a los accesorios tipo "Te" con flujo divergente como los componentes que generan la mayor pérdida de energía singular en el sistema para los tres materiales. Este hallazgo subraya su importancia como puntos críticos en el diseño de redes.

Si bien los tres modelos de cálculo (Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning) dieron como resultado magnitudes de pérdida diferentes, fueron consistentes en identificar la misma jerarquía de eficiencia entre los materiales, validando así las conclusiones sobre el rendimiento relativo de las tuberías.

Esta concordancia entre métodos coincide con lo reportado por *Rehan (2019)*, quien también verificó la consistencia de las ecuaciones en el análisis de sistemas de tuberías.

## BIBLIOGRAFIA

Brown, G. O. (2002). The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance (p. 43).

Castillo Calderón, J., Solórzano Castillo, B., & Moreno Moreno, J. (2018). Diseño de una red neuronal para la predicción del coeficiente de pérdidas primarias en régimen de flujo turbulento. *Ingenium. Revista de Ciencia y Tecnología*. (20), <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16390>

Gavilánez-Luna, F. (2020). Incidencia de la presión sobre el coeficiente de rugosidad C de Hazen-Williams. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2223>

Guaycochea, D. (1995). *Fórmulas sencillas para el cálculo de longitudes equivalentes*. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

Liu, T., Li, S., Jiang, C., Zhang, X., & Tan, Z. (2023). Local resistance characteristics of T-type tee based on chamfering treatment. *Sustainability*, 5(19), 14611. <https://doi.org/10.3390/su151914611>

Rehan, J. (2019). Frictional head loss relation between Hazen-Williams.

Stefan, S., Bosomoiu, M., & Teodorescu, G. (2023). The behavior of polymeric pipes in drinking water. *Polymers*, 15(19), 3872. <https://doi.org/10.3390/polym15193872>

Vegas Niño, O. T., & Martínez Alzamora, F. (2018). Equivalencia de coeficientes de rugosidad. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18393.98401/1>