




# Influence of fine sediment concentration on the hydraulic gradient for water flow in pressure pipes

Luis Vásquez-Ramírez, Dr.<sup>1</sup> , Julio Chuquilín-López<sup>1</sup>  and Sophia Vásquez-Bazán<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN)-Cajamarca, Perú, [luis.vasquez@upn.pe](mailto:luis.vasquez@upn.pe), [N00020697@upn.pe](mailto:N00020697@upn.pe)

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Cajamarca (UNC)-Cajamarca, Perú, [avasquezb17\\_1@unc.edu.pe](mailto:avasquezb17_1@unc.edu.pe)

**Abstract** - The hydraulic transport of sediments in circular conduits that work under pressure is subject to changes in the flow conditions that basically affect the pressure losses due to friction and therefore the hydraulic gradient of the flow, which depends on the concentration of suspended sediments. In this sense, in the present work, the dependence of the sediment concentration of the water-fine sediment mixture on the hydraulic gradient of the flow was analyzed, for which experimental laboratory tests were carried out, in Polyvinyl Chloride (PVC) pipes with diameters nominal values of ½", 1" and 1 ½" for ML-type water-sediment mixtures (clayey silts), with concentrations by weight ( $C_w$ ) of 1%, 3%, 5% and 7%, taking as baseline the flow for clear waters ( $C_w=0\%$ ). In this sense, it is evident that there is a positive linear correlation between the flow velocity of the water-sediment mixture and the hydraulic gradient ( $S_f$ ) for all the concentrations studied, also fulfilling that for the same flow velocity at a higher concentration of fine sediment in the greater mixture is the hydraulic gradient and vice versa. On average, the increase in the hydraulic gradient generated by the flow of mixtures of water with fine clayey silt sediment with concentrations of 1%, 3%, 5% and 7% for flow speeds between 0.9 m/s to 1.8 m/s in PVC pipes, is fulfilled: for 1/2" diameter it goes from 14% to 128%, for 1" diameter pipe it goes from 37% to 373% and for 1 ½" diameter pipe it goes from 68% to 811%, increments measured on the baseline of the hydraulic gradients of the flow with clear waters. Since water pipes are not always made for clear water, it is necessary to replicate this research with other types of sediments.

**Keywords:** Suspended sediment, mixing, hydraulic gradient, pressure losses

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Influencia de la concentración del sedimento fino en el gradiente hidráulico para flujo de agua en tuberías a presión

Luis Vásquez-Ramírez, Dr.<sup>1</sup>, Julio Chuquilín-López<sup>1</sup> y Sophia Vásquez-Bazán<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte (UPN)-Cajamarca, Perú, [luis.vasquez@upn.pe](mailto:luis.vasquez@upn.pe), [N00020697@upn.pe](mailto:N00020697@upn.pe)  
<sup>2</sup>Universidad Nacional de Cajamarca (UNC)-Cajamarca, Perú, [avasquezb17\\_1@unc.edu.pe](mailto:avasquezb17_1@unc.edu.pe)

**Resumen** - El transporte hidráulico de sedimentos en conductos circulares que trabajan a presión está sometido a cambios en las condiciones de flujo que inciden básicamente en las pérdidas de carga por fricción y por tanto en el gradiente hidráulico del flujo el cual depende de la concentración de sedimentos en suspensión. En tal sentido en el presente trabajo se analizó la dependencia de la concentración del sedimento de la mezcla agua-sedimento fino sobre el gradiente hidráulico del flujo, para ello se ejecutaron ensayos experimentales de laboratorio, en tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC) con diámetros nominales de ½", 1" y 1 ½" para mezclas de agua-sedimentos del tipo ML (limos arcillosos), con concentraciones en peso ( $C_w$ ) de 1%, 3%, 5% y 7%, tomando como línea base el flujo para aguas claras ( $C_w=0\%$ ). En tal sentido se evidencia que existe una correlación lineal positiva entre la velocidad de flujo de la mezcla agua-sedimento y el gradiente hidráulico ( $S_f$ ) para todas las concentraciones estudiadas, cumpliéndose además que para una misma velocidad de flujo a mayor concentración de sedimento fino en la mezcla mayor es el gradiente hidráulico y viceversa. En promedio el incremento del gradiente hidráulico generado por el flujo de mezclas de agua con sedimento fino limo arcilloso con concentraciones de 1%, 3%, 5% y 7% para velocidades de flujo entre 0.9 m/s a 1.8 m/s en tuberías PVC, se cumple: para diámetro 1/2" va desde 14% hasta 128%, para la tubería de diámetro 1" va desde 37% hasta 373% y para la tubería de diámetro 1 ½" va desde 68% hasta 811%, incrementos medidos sobre la línea base de los gradientes hidráulicos del flujo con aguas claras. Dado que las conducciones de agua no siempre se hacen para aguas claras se hace necesario replicar esta investigación con otro tipo de sedimentos.

**Palabras claves:** Sedimento en suspensión, mezcla, gradiente hidráulico, pérdidas de carga

## I. INTRODUCCIÓN

La población en el mundo ha ido creciendo, generando una mayor demanda de agua para distintos usos como: consumo humano, riego, generación de energía eléctrica entre otros, pues en las zonas menos favorecidas, por necesidad se captan aguas que en algunas épocas del año pierden su condición de aguas claras por la presencia de sedimentos finos en suspensión generadas en sus cuencas colectoras por las

lluvias, en tal sentido el fluido captado se convierte en una mezcla agua-sedimentos con distintas concentraciones, hecho que modifica la conducción por la variación de sus condiciones de flujo, lo que merma su cantidad y calidad en el punto receptor; dada la variabilidad y la aleatoriedad de las mezclas en cuanto a la cantidad y tipo de sedimento, es necesario contar con investigaciones al nivel experimental que nos acerquen en el conocimiento del comportamiento de estos tipos de flujo.

[1] indica que los sistemas hidráulicos encargados de la distribución de agua a los usuarios tienen un rol importante en su calidad de vida. Por ello, la determinación de manera precisa del factor de fricción en tuberías es de gran importancia en el diseño de redes de distribución de agua debido a que influye directamente en el cálculo de caídas de presión (pérdidas de carga) en los sistemas hidráulicos. Pero cuando el fluido está constituido por una mezcla agua-sedimento, las condiciones de flujo son modificadas. [2] menciona que se hace necesario implementar un modelo operativo que tenga en cuenta la concentración de turbidez en el flujo y la composición estructural de sistemas dispersos; métodos para el cálculo de los parámetros de flujo en el proceso de hidro transporte, teniendo en cuenta la variabilidad de su concentración, recomendando en tuberías cilíndricas estimar las pérdidas de carga específicas para el flujo de líquidos y sólidos y el efecto de la variabilidad de la composición mecánica de partículas y concentración de turbidez sobre el caudal y la potencia del modificado sistema disperso.

Desde la década de los sesenta ya se tenía especial interés en investigar el comportamiento de las partículas sólidas en los conductos cerrados que transportaban mezclas de agua con sedimentos en suspensión, [3] indicaba que el flujo de mezclas en tuberías horizontales es un fenómeno complejo poco susceptible de estudio teórico. Se ha descubierto que es posible correlacionar los datos obtenidos en una gama bastante amplia de condiciones y también se menciona el flujo en tuberías verticales e inclinadas, pues el paso de sólidos a través de máquinas y tuberías provoca la rotura de las partículas y el desgaste de las piezas metálicas. [4] prueba la aplicabilidad de una ley teórica de resistencia al flujo cargado de sedimentos en tuberías, recomendando que al principio se aplique la teoría de la autosimilitud incompleta (ISS) para deducir el perfil de velocidad y luego se debe aplicar la ley de

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).  
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).  
DO NOT REMOVE

resistencia al flujo correspondiente. Por otro lado [5] indica que el diseño, el control y la operación segura y efectiva de un sistema de transporte hidráulico agua con sedimentos requieren la predicción exitosa del comportamiento del flujo de la mezcla en la tubería. Menciona que el comportamiento del flujo de la mezcla no solo depende de las propiedades de los sólidos y del portador, sino que también se ve fuertemente afectado por la interacción mutua partícula-partícula y partícula líquido.

[6] indica que el transporte hidráulico de sólidos a través de sistemas de tuberías es ampliamente utilizado en distintos procesos de la industria de la construcción, química, minera y alimenticia, entre otros. Por lo que, para su correcto diseño, el cálculo de la velocidad de depósito y las pérdidas de carga es fundamental para asegurar el transporte total de las partículas presentes en la mezcla sólidos-líquido. Investigadores como [7] y [8] experimentaron el flujo de mezclas con sedimentos en tuberías de presión para medir la resistencia al flujo y las caídas de presión obteniendo coeficientes de fricción de fluidos no-newtonianos. Emplearon sistemas de transporte con varios accesorios en los que se hicieron pasar los fluidos de prueba, midiendo el flujo volumétrico y las pérdidas de presión. Los coeficientes de fricción que se obtuvieron para el agua como fluido de referencia que contienen sedimentos con distribución uniforme con mezclas influenciadas por el espesamiento por cizallamiento, con forme se incrementaba el porcentaje de concentración de sedimentos.

En cuanto a las características hidráulicas que dominan el flujo de mezclas agua-sedimento, [9] menciona que la caída de presión es la principal característica del transporte hidráulico en tuberías. El cómo predecir el gradiente hidráulico del transporte de la mezcla a través de tuberías es vital en la ingeniería. Por lo que al igual que [10] y [11], [9] orientó sus investigaciones a cuantificar la caída de presión en el transporte hidráulico de mezclas de agua sedimento en tuberías cilíndricas, condiciones que están influenciadas por la velocidad y la concentración, así como por el tamaño de las partículas. De igual forma [12] profundizó el conocimiento en el transporte de mezcla sólido-líquido a través de tuberías, desarrollando estudios experimentales del cómo transportar lodos a través de sistemas de tuberías, sus pruebas experimentales incluyeron mediciones de los principales parámetros que afectan el transporte de mezcla sólido-líquido, estos parámetros se deducen aplicando un enfoque adimensional, que incluye el número de Reynolds, el número de Froude, la concentración, la gravedad específica y la relación entre la partícula y el diámetro de la tubería.

Otra condición importante para el estudio del flujo de mezclas agua sedimento viene a ser la velocidad de sedimentación dentro del conducto, en tal sentido [13] indica que existe una velocidad crítica para el sedimento en la tubería que debe mantenerse de tal manera que el sedimento transportado permanezca en suspensión y minimice el contacto con la pared de la tubería para mantener las pérdidas por fricción al mínimo. A la vez [2] analizó la dependencia de las propiedades de flujo turbio en la composición de la

dispersión y la concentración de partículas sólidas, su investigación la orientó a determinar las características de la transferencia de sólidos suspendidos de río y agua en las estaciones de presión, es decir, el efecto sobre la distribución de parámetros cinemáticos y dinámicos del flujo de partículas suspendidas de transporte hidráulico.

La pérdida de carga por fricción en tuberías que conducen aguas con concentraciones de sedimentos aplica en muchos campos del conocimiento humano, enfocados a mejorar nuestras condiciones de vida, es así que muchos investigadores en el mundo han desarrollado trabajos experimentales que apuntan a esta causa noble, como: [14] quién afirma que en las últimas dos décadas, el dragado hidráulico se está utilizando como una solución de ingeniería viable para restaurar la sustentabilidad de los embalses, o [15] que desarrolló y calibró un modelo de transporte de sedimentos dentro de una tubería de presión en una región urbana en el norte de Alemania que fue monitoreado por mediciones de sólidos suspendidos totales en línea, o [16] quién logró determinar el comportamiento de los depósitos de sedimentos en las alcantarillas y su influencia en el rendimiento hidráulico de las tuberías de alcantarillado, o [17] que presentó un esquema de diseño novedoso basado en la mecánica de fluidos de ingeniería para el mecanismo de drenaje de lodos de tipo tubería única de tanques de sedimentación en la industria de tratamiento de aguas residuales, o [18] que desarrolló una investigación experimental del transporte de sedimentos en tuberías presurizadas, con sedimentos heterogéneos ( $d_{50} = 107 \mu\text{m}$ ) de la parte baja del río Amarillo como material experimental, o [19] quién presentó los resultados de las investigaciones sobre la influencia de las principales pérdidas de carga en las tuberías de suministro de agua después de 30 años de explotación, o [20] quién presentó los resultados de un estudio de laboratorio exhaustivo de los efectos de un fluido portador de sedimentos (arcilla) de grano fino sobre el gradiente hidráulico de sedimentos del tamaño de arena (600 a 2000 micrones) en una tuberías de 103 mm de diámetro. Con los que demostró que los fluidos portadores de arcilla exhibieron propiedades de fluidos tanto newtonianos como no newtonianos.

En urbes del ámbito rural o en zonas menos privilegiadas de las grandes ciudades donde el acceso a la tecnología es muy baja o el poder adquisitivo no permite invertir en un tratamiento adecuado del agua para su uso en las diferentes actividades, los usuarios se encuentran obligados a utilizar el agua directamente de las fuentes que están a la mano, que en muchos de los casos sus aguas son contaminadas con sedimentos finos como limos y arcillas que son transportadas hasta los puntos de consumo, pues en regiones donde las precipitaciones son recurrentes se genera un escurrimiento superficial abundante de este tipo de aguas, en tal sentido, es importante para el diseño de los sistemas de conducción de aguas no claras, el conocimiento de la concentración de sólidos en suspensión, ya que éstos modifican las condiciones de flujo debido a los cambios en la viscosidad del agua, acción

que impacta directamente en las pérdidas de carga por fricción y el gradiente hidráulico del flujo. Generando que los sistemas de conducción no funcionen adecuadamente. Por ende, se genera la necesidad de conocer en ¿cuál es el incremento del gradiente hidráulico para flujo de mezclas a diferentes concentraciones de agua-sedimento fino en conductos a presión de Policloruro de Vinilo (PVC)?, entendiendo que en muchos de los casos las mezclas agua-sedimentos tienen una variabilidad de concentraciones dependiendo de la intensidad y duración de las precipitaciones en sus cuencas colectoras.

## II. MATERIALES Y MÉTODO

El tipo de investigación fue del tipo experimental, analizando el efecto producido en la variable dependiente (gradiente hidráulico) al manipular las variables independientes (concentración de sedimentos y diámetros de tuberías), para lo cual fue necesario confeccionar un sistema de recirculación por bombeo en el laboratorio de hidráulica, para llevar a cabo los ensayos requeridos, con las concentraciones de limos y arcillas adecuadas, además de la instalación de tuberías, con sus respectivos piezómetros, que sirvieron para obtener la data necesaria.

La investigación fue planteada en cinco etapas, y fue fundamentada en el flujo permanente de fluidos en conductos circulares que trabajan a presión.

La **primera etapa** de la investigación se orientó a la selección y preparación del sedimento fino (limo y arcilla). Para la preparación de las mezclas en concentraciones en peso (Cw) del 1%, 3%, 5% y 7% de sedimento fino, se consideró:

- Selección y preparación del sedimento sólido para la mezcla en suspensión con partículas finas. Identificación de la cantera de material fino uniforme libre de impurezas, luego se extrajo una cantidad adecuada de material para proceder a secar y triturarla utilizando un martillo de goma, tratando de dejarla con la mayor cantidad de finos, para finalizar con el tamizado de la muestra con la malla No 200 y así obtener el material que pasa, material que será utilizado en los ensayos de laboratorio.
- Ensayo de peso específico del suelo. Según NTP 339.131 (ASTM D854) – Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo.
- Ensayo de límites de consistencia o límites de Atterberg. Según NTP 339.129 (ASTM D4318) – Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad de suelos.
- Clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Se consideró la norma NTP 339.134 – Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS).

La **segunda etapa** consistió en estimar la viscosidad dinámica de la mezcla en suspensión Newtoniana, pues según [21] es posible calcular dichas viscosidades con mucha aproximación en función de la concentración de sedimentos en volumen (Cv), para lo cual se utilizaron dos ecuaciones:

Para la viscosidad Absoluta (o dinámica) de las mezclas con sólidos con una concentración de volumen menor que 1%

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = 1 + 2.5 C_v \quad (1)$$

Donde, “ $\mu_m$ ” representa la viscosidad absoluta (o dinámica) de una mezcla en suspensión y “ $\mu_L$ ” representa la viscosidad absoluta (o dinámica) del líquido.

Para la viscosidad Absoluta (o dinámica) de las mezclas con sólidos con una concentración de volumen menor que 20%

$$\frac{\mu_m}{\mu_L} = 1 + K_1 C_v + K_2 C_v^2 + K_3 C_v^3 + K_4 C_v^4 + \dots \quad (2)$$

Siendo, K1, K2, K3 y K4 constantes, pues “K1” es la constante de Einstein de 2,5, y K2 se ha encontrado que está en el rango de 10,05 a 14,1 de acuerdo con Guth y Simha, citado por [21]. Además, indica que es difícil extrapolar los términos K3 y K4 por ello que son ignorados con concentraciones volumétricas menores que 20%, que es el caso de esta investigación.

La **tercera etapa** consistió en la instalación del sistema de recirculación cerrado para determinar las pérdidas de carga por fricción en tuberías, para ello se utilizaron los siguientes materiales y equipos: 2 recipientes de 150 litros cada uno, 1 electro bomba periférica de 1HP, 1 balanza digital, 1 medidor volumétrico de agua, tubos de PVC clase 10 de  $\varnothing = 1/2"$ ,  $\varnothing = 1"$ ,  $\varnothing = 1 1/2"$ , piezómetros de vidrio de  $\varnothing = 3/8"$  de 1.5 m de longitud, 1 válvula check 3/4", 1 válvula globo de 1 1/2" y accesorios de PVC (codos, uniones universales, niples, adaptadores, uniones, reducciones, etc), que fueron ensamblados según el esquema presentado en la Fig. 1.

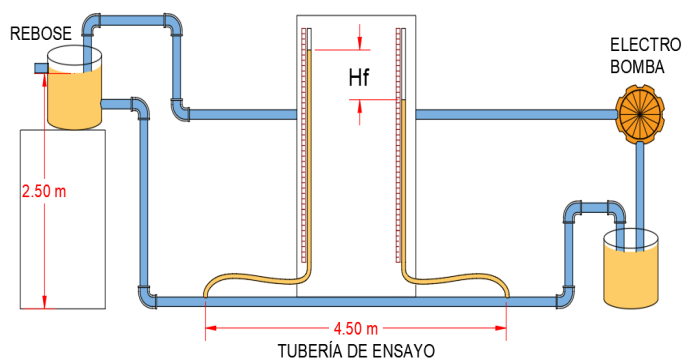


Fig. 1 Sistema de recirculación cerrado para ensayos en laboratorio

Teniendo en cuenta que en las tuberías de ensayo se tenía que medir la pérdida de energía se verificó la horizontalidad en el tramo de ensayo que se consideró de 4.50 m. en cuyos extremos se conectaron los piezómetros correspondientes. El material de las tuberías de ensayo fue de PVC con diámetros nominales de 1/2", 1" , 1 1/2".

En cada extremo de las tuberías se instalaron 0.5m de tubería del mismo diámetro, así como también los accesorios necesarios (uniones, reducciones y/o ampliaciones) para su respectiva conexión con la tubería de salida del tanque de almacenamiento.

El sistema de recirculación fue abastecido por una electrobomba periférica de 1 HP, con sus respectivos accesorios en la tubería de succión como una válvula de pie con su respectiva canastilla, de igual forma en la tubería de impulsión se instalaron dos válvulas compuerta, una de las cuales sirvió para regular el agua bombeada, mientras que la otra cumplió la función de regular el agua de retorno al recipiente de descarga (cárcamo de bombeo).

La **cuarta etapa** consistió en la preparación de mezclas de agua con sedimentos en suspensión a concentraciones de 1%, 3%, 5% y 7%, para ello fue necesario contar con una balanza digital con aproximación de 0.001 kg. y sedimento fino que pasa la malla No 200 (Limo y arcilla).

Para la preparación de la mezcla en primer lugar se graduó el recipiente de descarga para volúmenes de 20 L, 50 L y 100 L; luego se realizó el cálculo de la cantidad requerida de sedimentos, para alcanzar las concentraciones en peso necesarias en las mezclas para los ensayos, se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_w(\%) = \frac{W_s}{W_w + W_s} \quad (3)$$

Donde: “C<sub>w</sub> (%)” representa la concentración en peso (%); “W<sub>s</sub>” es el peso del sedimento (kg) y “W<sub>w</sub>” el peso del agua (kg) a la temperatura en que se desarrolla el ensayo.

Luego se procedió a pesar las cantidades requeridas para cada concentración a utilizar en los ensayos.

Se mezcló el agua con los sedimentos hasta obtener una mezcla homogénea para proceder a la experimentación.

La **quinta etapa** estuvo orientada a la realización de los ensayos con el fin de determinar las pérdidas de carga por fricción en las tuberías para las diferentes condiciones de flujo. Se ejecutaron 48 ensayos en total, siendo 16 ensayos por cada diámetro de tubería, con el arreglo que se muestra en la Fig. 2.

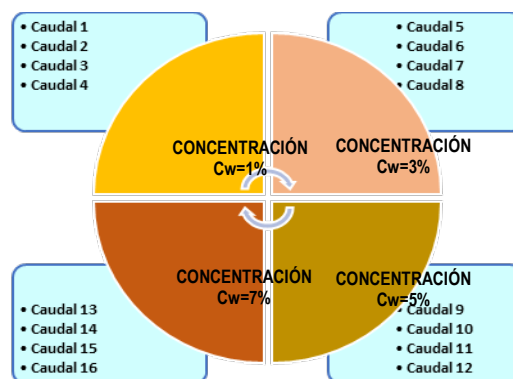


Fig. 2 Distribución de ensayos en laboratorio por cada diámetro de tubería.

Una vez listas las mezclas en suspensión, se procedió a calibrar el sistema de recirculación instalado, para cada uno de los 16 ensayos por cada diámetro de tubería a ensayar (1/2" , 1" y 1 1/2"), según la distribución presentada en la Figura 2.

Con el sistema de recirculación en funcionamiento, se procedió a regular la cantidad de salida y llegada a cada uno de los dos recipientes de almacenamiento, mediante las válvulas instaladas en la tubería de impulsión, para obtener el **flujo uniforme y permanente**, para luego realizar las lecturas correspondientes en los piezómetros utilizando formatos de recolección de información.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Dosificación de sedimento para la preparación de mezclas:

Los ensayos de laboratorio del sedimento utilizado en la investigación nos permiten clasificarlo como un material tipo ML, es decir, se trata de suelos limo arcillosos con ligera plasticidad, con LL, LP e IP de 45.20%, 17.17% y 28.03% respectivamente, en la Fig. 3 se presenta una muestra del sedimento sólido (a) y captura de ensayo en laboratorio (b).

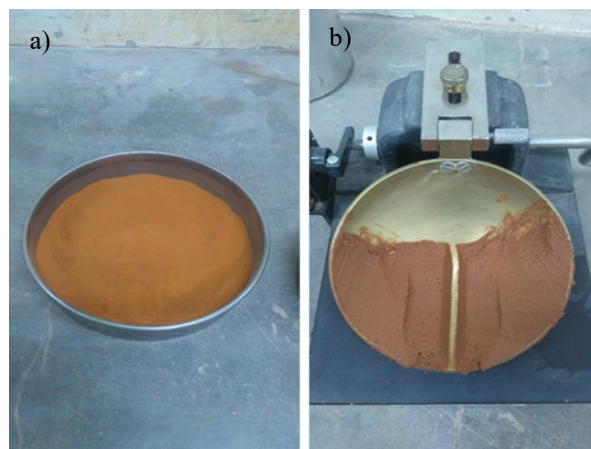


Fig. 3 a) Sedimento del tipo ML, b) Ensayo en laboratorio Fuente [22]



La tabla I, muestra las propiedades del agua y el sedimento utilizados en la mezcla agua-sedimento para las concentraciones en peso ( $C_w$ ) de 1%, 3%, 5% y 7%, así como la viscosidad dinámica de la mezcla estimada con las ecuaciones (1) o (2) según corresponda.

TABLA I  
VISCOSIDAD DINAMICA DE LAS MEZCLAS EN SUSPENSION  
NEWTONIANA PARA CONCENTRACIONES DE 1%, 3%, 5% Y 7%

$C_w$ (%)	$\rho_L$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_m$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$C_{TF}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\mu_L$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$\mu_m$ (N.s/m <sup>2</sup> )
1	0.9988	1.83	1.003	0.5483	0.001094	0.001096
3	0.9988	1.83	1.013	1.6599	0.001094	0.001099
5	0.9988	1.83	1.022	2.7923	0.001094	0.001102
7	0.9988	1.83	1.032	3.9459	0.001094	0.001105

Para conseguir un flujo continuo es necesario contar con fluido uniforme para cada ensayo en laboratorio, por lo que fue necesario elaborar mezclas para diferentes volúmenes de agua estimando el peso de sedimento a partir de la ecuación (3) para cada concentración y volumen de agua requerido, dichos resultados están indicados en la tabla II.

TABLA II  
DOSIFICACION EN PESO DEL SEDIMENTO PARA SU MEZCLA CON  
AGUA – CONCENTRACIONES DE 1%, 3%, 5% Y 7%

Concentración en peso $C_w$ (%)	Volumen de agua en litros	Peso de sedimentos (kg)
1	100	1.01
3	100	3.09
5	100	5.26
7	100	7.52
1	50	0.50
3	50	1.54
5	50	2.63
7	50	3.76
1	20	0.20
3	20	0.62
5	20	1.05
7	20	1.50

### Pérdidas de carga por fricción:

La fig. 5, nos permite visualizar la pérdida de carga por fricción en una tubería, generadas bajo las mismas condiciones geométricas de flujo. A la izquierda " $H_{f0}$ " para aguas claras sin sedimentos ( $C_w=0\%$ ) y a la derecha " $H_{f5}$ " para mezcla de agua con sedimentos con una concentración del 5% ( $C_w=5\%$ ). Proceso que se ha desarrollado para los tres diámetros de tubería 1/2", 1" y 1 1/2" y para concentraciones de 1%, 3%, 5% y 7%.

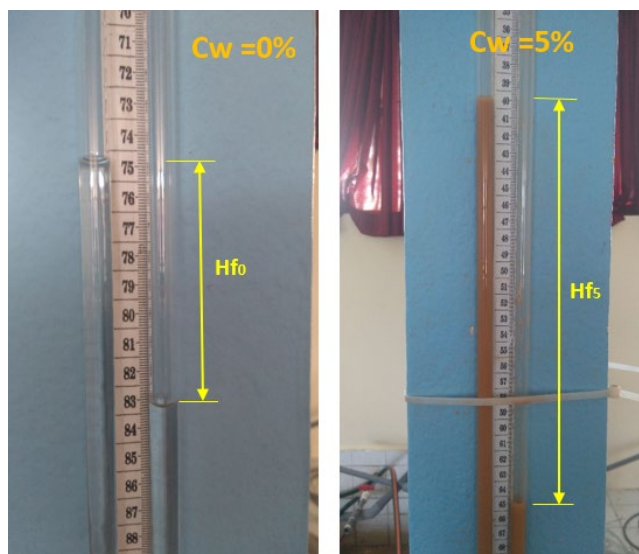


Fig. 4 Pérdida de carga por fricción para dos concentraciones de sedimentos ( $C_w=0\%$  y  $C_w=5\%$ )

Fuente [22]

### Gradiente hidráulico experimental:

Con la intención de realizar una mejor visualización y un análisis comparativo más objetivo se procedió a estimar el gradiente hidráulico para cada ensayo, para lo cual se utilizó la ecuación (4).

$$Sf = \frac{Hf}{L} \quad (4)$$

Donde: "Sf" representa el gradiente hidráulico en (m/m); "Hf" representa la pérdida de carga por fricción en la tubería en (m) y "L" representa la longitud de tubería en la que se está generando la pérdida de carga en (m), que para el caso específico de la investigación tiene un valor de 4.50 m.

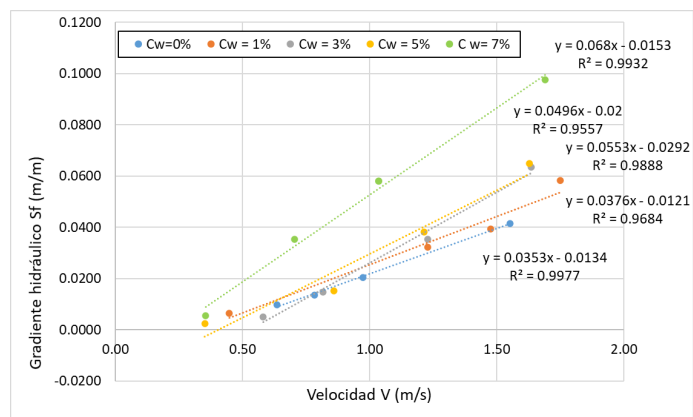


Fig. 5 Velocidad de flujo versus gradiente hidráulico, para una tubería de 1/2" de diámetro.

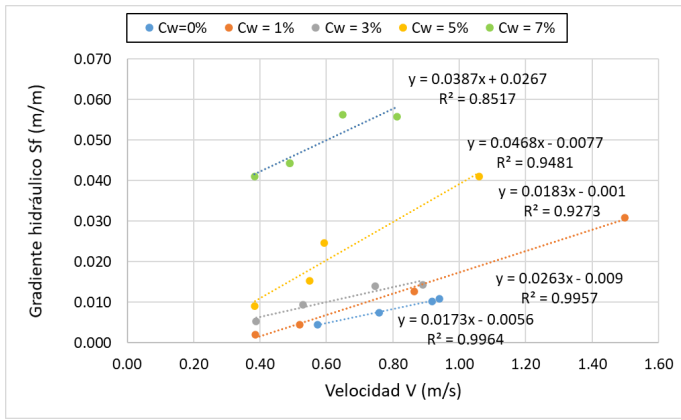


Fig. 6 Velocidad de flujo versus gradiente hidráulico, para una tubería de 1" de diámetro.

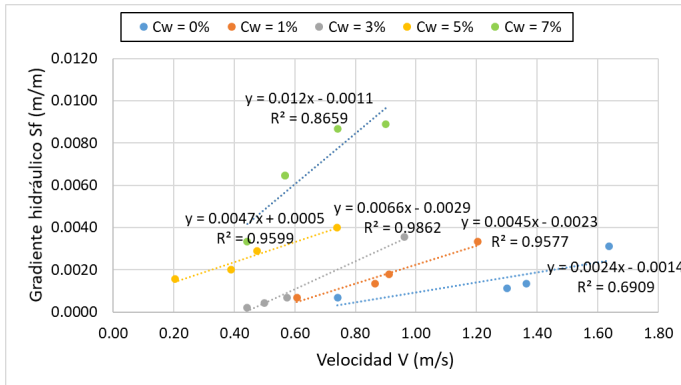


Fig. 7 Velocidad de flujo versus gradiente hidráulico, para una tubería de 1 1/2" de diámetro.

En las figuras 5, 6 y 7 se representan los resultados experimentales de las velocidades de flujo de agua clara sin sedimentos ( $C_w=0\%$ ) y para las mezclas con concentraciones de sedimentos de ( $C_w=1\%$ ,  $3\%$ ,  $5\%$  y  $7\%$ ), las cuales se correlacionan en forma lineal con el gradiente hidráulico correspondiente para los ensayos considerados en la investigación. Pues es importante hacer notar que existe una relación directa entre la velocidad de flujo y el gradiente hidráulico pues a mayor velocidad de flujo mayor también es el gradiente hidráulico, lo que indica que a mayor concentración de sedimentos menor es la velocidad de flujo por lo que el gradiente hidráulico también es menor, resultados que concuerdan con los presentados por [12], que indica que a medida que la concentración de sedimentos aumenta el gradiente hidráulico disminuye. Por lo que es necesario tener muy en cuenta el tipo de fuente de agua a conducir por un conducto a presión ya que, al aumentar la pérdida de carga en una conducción a presión, disminuye la capacidad de transporte del fluido.

### Incremento del gradiente hidráulico:

Es muy importante conocer en qué porcentaje va incrementándose la pérdida de carga o el gradiente hidráulico cuando la concentración de sedimentos en las mezclas de agua con diferentes concentraciones va incrementándose, para ello utilizamos la ecuación (5).

$$\Delta Sf(\%) = \left( \frac{Sf_i}{Sf_0} - 1 \right) * 100 \quad (5)$$

Siendo: “ $\Delta Sf(\%)$ ” el porcentaje de incremento del gradiente hidráulico para agua con sedimentos, “ $Sf_0$ ” representa el gradiente hidráulico para el agua clara (sin sedimentos) mientras que “ $Sf_i$ ” representa el gradiente hidráulico para los otros flujos con diferentes mezclas, siendo  $Sf_1$ ,  $Sf_3$ ,  $Sf_5$  y  $Sf_7$  los gradientes hidráulicos para concentraciones de  $1\%$ ,  $3\%$ ,  $5\%$  y  $7\%$  respectivamente.

TABLA III  
INCREMENTO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO PARA  
CONCENTRACIONES DE SEDIMENTO DEL  $1\%$  Y  $3\%$

Velocidad (m/s)	Concentración ( $C_w=0\%$ )		Concentración ( $C_w=1\%$ )		Concentración ( $C_w=3\%$ )	
	$Sf_0$	(%)	$Sf_1$	$\Delta Sf(\%)$	$Sf_3$	$\Delta Sf(\%)$
TUBERIA $\varnothing 1/2"$						
0.9	0.01837	0%	0.02174	18%	0.02057	12%
1.2	0.02896	0%	0.03302	14%	0.03716	28%
1.5	0.03955	0%	0.04430	12%	0.05375	36%
1.8	0.05014	0%	0.05558	11%	0.07034	40%
Promedio del incremento			14%		29%	
TUBERIA $\varnothing 1"$						
0.9	0.00997	0%	0.01467	47%	0.01547	55%
1.2	0.01516	0%	0.02256	49%	0.02096	38%
1.5	0.02035	0%	0.03045	50%	0.02645	30%
1.8	0.02554	0%	0.03834	50%	0.03194	25%
Promedio de incremento			49%		37%	
TUBERIA $\varnothing 1 1/2"$						
0.9	0.00076	0%	0.00115	51%	0.00304	300%
1.2	0.00148	0%	0.00250	69%	0.00502	239%
1.5	0.00220	0%	0.00385	75%	0.00700	218%
1.8	0.00292	0%	0.00520	78%	0.00898	208%
Promedio de incremento			68%		241%	

TABLA IV  
INCREMENTO DEL GRADIENTE HIDRÁULICO PARA  
CONCENTRACIONES DE SEDIMENTO DEL 5% Y 7%

Velocidad (m/s)	Concentración (Cw= 0%)		Concentración (Cw= 5%)		Concentración (Cw= 7%)	
	Sf <sub>0</sub>	(%)	Sf <sub>1</sub>	ΔSf (%)	Sf <sub>3</sub>	ΔSf (%)
TUBERIA Ø 1/2"						
0.9	0.01837	0%	0.02464	34%	0.04590	150%
1.2	0.02896	0%	0.03952	36%	0.06630	129%
1.5	0.03955	0%	0.05440	38%	0.08670	119%
1.8	0.05014	0%	0.06928	38%	0.10710	114%
Promedio de incremento			37%		128%	
TUBERIA Ø 1"						
0.9	0.00997	0%	0.03442	245%	0.06153	517%
1.2	0.01516	0%	0.04846	220%	0.07314	382%
1.5	0.02035	0%	0.06250	207%	0.08475	316%
1.8	0.02554	0%	0.07654	200%	0.09636	277%
Promedio de incremento			218%		373%	
TUBERIA Ø 1 1/2"						
0.9	0.00076	0%	0.00473	522%	0.00970	1176%
1.2	0.00148	0%	0.00614	315%	0.01330	799%
1.5	0.00220	0%	0.00755	243%	0.01690	668%
1.8	0.00292	0%	0.00896	207%	0.02050	602%
Promedio de incremento			322%		811%	

En las tablas III y IV, se muestran los resultados de los incrementos del gradiente hidráulico, estimados para velocidades de 0.9, 1.2, 1.5 y 1.8 m/s. para los tres diámetros de ensayo como son 1", 1/2" y 1 1/2", considerando las concentraciones de sedimentos de 1%, 3%, 5% y 7%. Además, se ha considerado el promedio como el valor representativo de los incrementos para las diferentes condiciones de flujo.

### Incremento del gradiente hidráulico por diámetro de tubería:

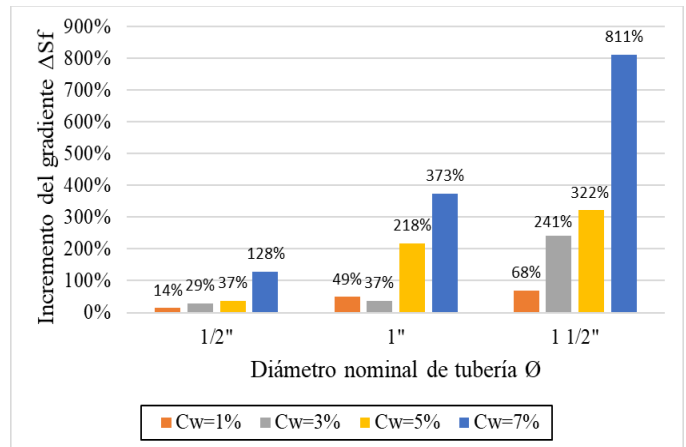


Fig. 8 Incremento del gradiente hidráulico para la misma velocidad de flujo

De los resultados plasmados en la Fig. 8 podemos inferir que a mayor concentración de sedimentos existe un incremento del gradiente hidráulico y por ende de las pérdidas de carga en éste tipo de flujos, pues si bien es cierto dicho incremento depende de la velocidad de flujo pero también tiene mucha influencia la sección de la tubería, específicamente el área de contacto que está definida por el perímetro mojado con el fluido en movimiento, recordando que a mayor sección de contacto mayor será la resistencia al flujo por el efecto de la viscosidad del fluido, siendo mayor esta resistencia en las secciones de mayor área de contacto, lo que nos lleva a corroborar los resultados de [18] que en su estudio exploró principalmente la ley de cambio del transporte de sedimentos en tuberías de presión con un diámetro interno de 0,08 m y cuyos resultados experimentales revelaron que la presencia de sedimentos cambió significativamente la distribución del campo de velocidad del flujo, hecho que fue previsto también por [2] en su investigación denominada "modificación de sistemas de dispersión y su movimiento en tuberías cilíndricas", así como por [7], quién encontró en su investigación experimental que los coeficientes de fricción obtenidos aumentaron con incremento debido al comportamiento reológico del fluido.

De los resultados podemos evidenciar que la disminución de la velocidad de flujo (mezcla agua-sedimento) no es un indicador de mayor eficiencia de conducción, sino al contrario si bien es cierto disminuye la velocidad y por tanto el gradiente hidráulico, pero disminuye también la eficiencia de conducción del flujo másico o volumétrico, tal como lo evidenció [10], quién introdujo los términos condición mínima de transporte (MTC) y gradiente de presión (PG), ya que si las concentraciones de la mezcla no cumplen con la MTC no estarán cumpliendo con su objetivo de conducción, resultados obtenidos en su investigación realizada para mezcla elaborada con sedimento fino (arcillas y limos).



#### IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las concentraciones de arcillas y limos presentes en fuentes de agua generan un incremento en la viscosidad dinámica del fluido desde 0.2% hasta 1% para mezclas agua-sedimento con concentraciones en peso ( $C_w$ ) de 1% a 7%.

Existe una correlación lineal positiva entre la velocidad de flujo de la mezcla agua-sedimento y el gradiente hidráulico ( $S_f$ ) para todas las concentraciones en peso ( $C_w$  de 1%, 3%, 5% y 7%), cumpliéndose además que para una misma velocidad de flujo a mayor concentración de sedimento fino en la mezcla mayor es el gradiente hidráulico y viceversa. Mientras que para un mismo sistema de conducción a presión a mayor concentración de sedimentos menor es la velocidad de flujo y por tanto menor también es el gradiente hidráulico.

En promedio el incremento del gradiente hidráulico generado por el flujo de mezclas de agua con sedimento fino limo arcilloso con concentraciones de 1%, 3%, 5% y 7% para velocidades de flujo entre 0.9 m/s a 1.8 m/s en tuberías PVC, se cumple: para diámetro 1/2" va desde 14% hasta 128%, para la tubería de diámetro 1" va desde 37% hasta 373% y para la tubería de diámetro 1 1/2" va desde 68% hasta 811%, incrementos medidos sobre la línea base de los gradientes hidráulicos del flujo con aguas claras.

#### REFERENCIAS

- [1] A. Olivares, et al. "Evaluación experimental de correlaciones para el cálculo del factor de fricción para flujo turbulento en tuberías cilíndricas," Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, vol. 35, no 1, 2019.
- [2] Rakhimov, Kudrat, et al. "Modification of dispersion systems and its motion in cylindrical pipes." E3S Web of Conferences. Vol. 264. EDP Sciences, 2021.
- [3] Worster, RC y DF Denny. "Transporte hidráulico de material sólido en tuberías". Actas de la Institución de Ingenieros Mecánicos 169.1 (1955): 563-586.
- [4] Ferro, Vito, and Alessio Nicosia. "Evaluating the Effects of Sediment Transport on Pipe Flow Resistance." Water 13.15 (2021): 2091.
- [5] El-Nahhas, Kamal y col. "Efecto de la distribución del tamaño de partículas en el transporte hidráulico de lodos de sedimentación". 13th International Water Technology Conference, IWTC13, Hurghada, Egipto. 2009.
- [6] Montserrat Michelini, Gonzalo Javier. "Estudio experimental de las pérdidas de carga en tuberías con flujos de mezclas sólidos líquido no-newtoniano en régimen laminar." (2015).
- [7] Bandala-Rocha, M. R., R. C. Macedo y Ramírez, and J. F. Vélez-Ruiz. "Evaluación de Coeficientes de Fricción en el Transporte de Fluidos No-Newtonianos." Información tecnológica 16.2 (2005): 73-80.
- [8] Carravetta, Armando, et al. "Performance of slurry flow models in pressure pipe tests." Journal of Hydraulic Engineering 142.2 (2016): 06015020.
- [9] Zhao, Lijuan y Fusheng Ni. "Análisis del cálculo del gradiente hidráulico del transporte de lodos en ductos basado en el modelo Wasp". ICPTT 2013: Tecnología sin zanjas. 2013. 203-210.
- [10] Archibong-Eso, A., et al. "Estudio experimental de las características del transporte de arena en tuberías de flujo sólido-líquido bifásicas horizontales e inclinadas". Revista de ingeniería y práctica de sistemas de tuberías 11.1 (2020): 04019050.
- [11] Arifjanov, Aybek, et al. "Transportation of river sediments in cylindrical pipeline." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 403. No. 1. IOP Publishing, 2019.
- [12] Abd Al Aziz, A. I., and H. I. Mohamed. "A Study of the Factors Affecting Transporting Solid—Liquid Suspension through Pipelines." Open Journal of Fluid Dynamics 2013 (2013).
- [13] Randall, Robert E. "Dinámica de fluidos del dragado". Física de Fluidos 34.1 (2022): 013304.
- [14] Kantoush, Sameh A., et al. "Pilot Field Implementation of Suction Dredging for Sustainable Sediment Management of Dam Reservoirs." Journal of Hydraulic Engineering 147.2 (2021): 04020098.
- [15] Rinas, Martin, et al. "Sediment transport in sewage pressure pipes, part ii: 1 D numerical simulation." Water 12.1 (2020): 282.
- [16] Banasiak, Robert. "Rendimiento hidráulico de tuberías de alcantarillado con sedimentos depositados". Ciencia y tecnología del agua 57.11 (2008): 1743-1748.
- [17] Feilin, Hao y Shen Mingwei. "Diseño, simulación y ensayo en laboratorio de una tubería simple de drenaje de lodos para tanque de sedimentación de tratamiento de aguas residuales". Ciencia y tecnología del agua 82.5 (2020): 905-917.
- [18] Li, Yan, et al. "Experimental Study on the Characteristics of Sediment Transport and Sorting in Pressurized Pipes." Water 13.19 (2021): 2782.
- [19] Wichowski, Piotr, et al. "Hydraulic and Technological Investigations of a Phenomenon Responsible for Increase of Major Head Losses in Exploited Cast-Iron Water Supply Pipes." Water 13.11 (2021): 1604.
- [20] Scott, Stephen H. y Steven R. Abt. "Transporte hidráulico de mezclas de sedimentos finos y gruesos en tuberías". Revista de ingeniería de transporte 128.1 (2002): 1-8.
- [21] Abulnaga, B. E. "Slurry Systems Handbook (2002)." New York: McGraw-Hill, 533.
- [22] Chuquilín López, J. C. (2016). Influencia de la concentración de sedimentos en suspensión en la pérdida de carga por fricción en tuberías de PVC.