

VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES EMPÍRICAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTRE Y SUSPENSIÓN EMPLEANDO MEDICIONES EN CAMPO

VALIDATION OF THE EMPIRICAL EQUATIONS OF SEDIMENT TRANSPORT BY DRAG AND SUSPENSION USING FIELD MEASUREMENTS

 Richard Antony Becerra Pintado ^{1a}
 Nayla Gisell Espinoza Requejo ^{1b}
 Guillermo Gustavo Arriola Carrasco ^{1c}
 Luis Mariano Villegas Granados ^{1d}
 Gioconda del Socorro Sotomayor Nunura ^{1e}



Fecha de recepción : 21/12/2020

Fecha de aprobación : 15/01/2021

Resumen

El presente artículo de investigación da a conocer la validación de las ecuaciones empíricas de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión empleando para ello mediciones de campo en el río Chancay – Lambayeque entre los puentes Pucalá y Monsefú – Eten. La problemática analizada de este trabajo es que al haber un aumento progresivo de los sedimentos en los ríos con material de fondo fino, estos tienden a reducir la capacidad hidráulica de la sección transversal provocando fallas en las riberas del mismo. Respecto a los trabajos de campo se realizaron mediciones de sedimentos con muestreadores manuales tipo Helley Smith y luego se llevaron a laboratorio para estudiar la granulometría, peso específico, velocidad de caída de partícula y concentración de sedimentos. La selección de los métodos se basó en la metodología de mejor ajuste destacando en los resultados con muy buena correlación las ecuaciones de Meyer – Peter y Müller, Schocklistch, Levi y Yalin para el transporte por arrastre y las ecuaciones de Chang, Simons & Richardson, Bagnold y Brooks para el transporte en suspensión que pueden ser aplicables para los ríos del norte del Perú.

Palabras clave: Ecuaciones empíricas, mediciones en campo, río Chancay, transporte de sedimentos.

Abstract

This research article presents the validation of the empirical equations of sediment transport by drag and suspension using field measurements in the Chancay – Lambayeque river between the Pucalá and Monsefú - Eten bridges. The problem analyzed in this work is that as there is a progressive increase in sediments in rivers with fine bottom material, these tend to reduce the hydraulic capacity of the cross section, causing failure on the banks of the river. Regarding the field work, sediment measurements were carried out with Helley Smith type manual samplers and then they were taken to the laboratory to study the granulometry, specific weight, particle fall speed and sediment concentration. The selection of the methods was based on the best fit methodology, highlighting in the results with very good correlation Meyer - Peter and Müller, Schocklistch, Levi and Yalin equations for drag transport and Chang, Simons & Richardson, Bagnold and Brooks equations for suspension transport that may be applicable to the rivers of northern Peru.

Key words: Empirical equations, field measurements, Chancay river, sediment transport

1. Introducción

¹ Universidad Señor de Sipán, Pimentel – Chiclayo, Perú.

^a Ingeniero Civil, richard10.becp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9308-3938>

^b Ingeniera Civil, requejong@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-8736-7811>

^c Ingeniero Civil, garriola@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-2861-1415>

^d Magister en Gestión Pública, vgranadoslm@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-5401-2566>

^e Doctora en Ciencias de la Educación, giocondasn@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-6082-0893>

La sedimentación y su acumulación es en la actualidad uno de los principales problemas que se presentan en los ríos a nivel mundial sobre todo en zonas de llanuras porque al aumentar el caudal éste trae consigo material fino y arenoso provocando en algunos casos erosión sobre todo en estructuras fluviales y en otros casos provoca acumulación sedimentaria, entonces debido a ello es necesario conocer en gran medida la cantidad de sedimentos que produce un río, así lo señalan en su investigación Medina Rosell, J. A., Mejía Marcacuzco, J. A., & Becerra Pajuelo, A. F. (2019) cuando explican la gran importancia de la hidrología, hidráulica fluvial y el régimen de transporte de sedimentos que permiten identificar el proceso de erosión y sedimentación de ríos en el transcurso del tiempo. Para ello existen diversas formulaciones y métodos teóricos, así como también equipos prácticos para la medición de sedimentos, sin embargo, debido a la falta de interés por parte de las entidades y profesionales relacionados a la gestión de recursos hídricos en cuanto a la medición de sedimentos sólo se ha visto limitado al estudio de embalses y bocatomas.

Esta investigación realizada en el río Chancay entre los puentes Pucalá y Monsefú – Eten, los que actualmente se encuentran con acumulación de sedimentos, conllevó a determinar la cantidad de sedimentos transportados en distintas fechas en un período de tres veces por semana en forma aleatoria durante un año tomado como referencia a Haun, S., Rütther, N., Baranya, S., & Guerrero, M. (2015) y de esta manera conocer las variaciones que ocurren en el transporte; cuantificándolo mediante ecuaciones empíricas propuestas por distintos investigadores. Al cuantificar el transporte de sedimentos se determinó cuál de las ecuaciones por arrastre y suspensión, son de mejor ajuste en las zonas de estudio en función a las mediciones previamente realizadas. Conociendo estos resultados, serán de mucha importancia al momento de querer realizar algún tipo de estructura hidráulica, teniendo datos del transporte de sedimentos por arrastre y suspensión de las zonas de estudio mencionadas, por lo que el ingeniero proyectista podrá optar y recomendar mejoras en el diseño hidráulico y/o estructural al momento que se tenga que proyectar y/o construir algún tipo de estructura.

2. Materiales y Métodos

El río Chancay ubicado al norte del Perú es uno de los ríos de la Región Lambayeque y Región Cajamarca el cual se he creído conveniente estudiarlo debido a que se han construido más obras de ingeniería (ver figura 1). El Puente Pucalá es un puente tipo pórtico conformado por vigas de acero de alma llena, losa de concreto armado y dos pilares ubicados a lo largo de sus 150 m de longitud, similarmente el Puente Monsefú – Eten presenta dos pilares circulares, dicho puente tiene una longitud de 152 m y es de tipo cantiléver con vigas pos-tensadas y losa de concreto armado. Los puentes en mención se muestran en la figura 2.

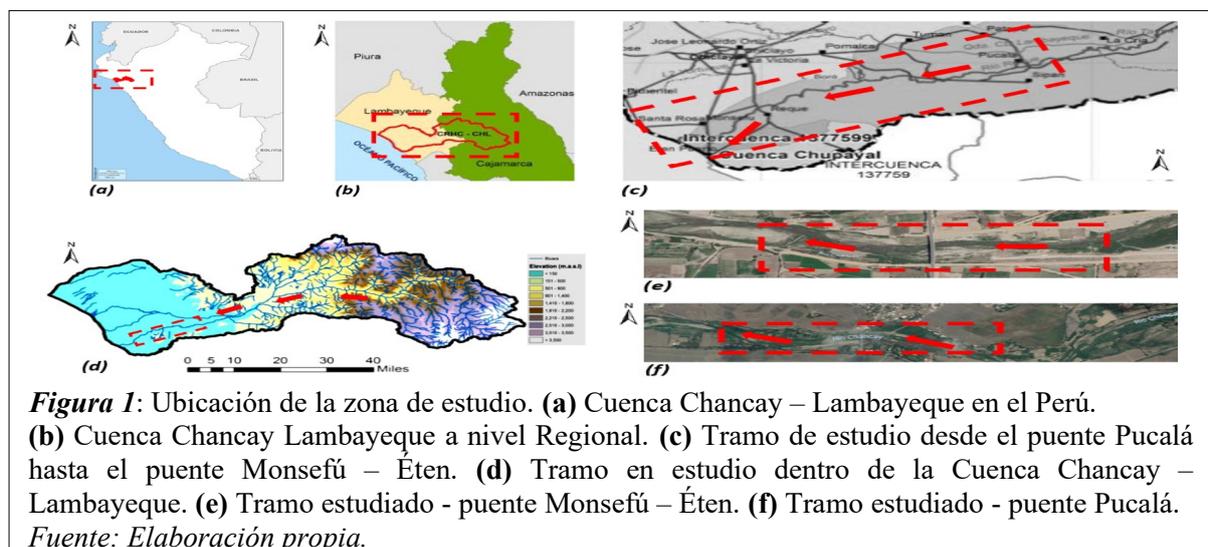




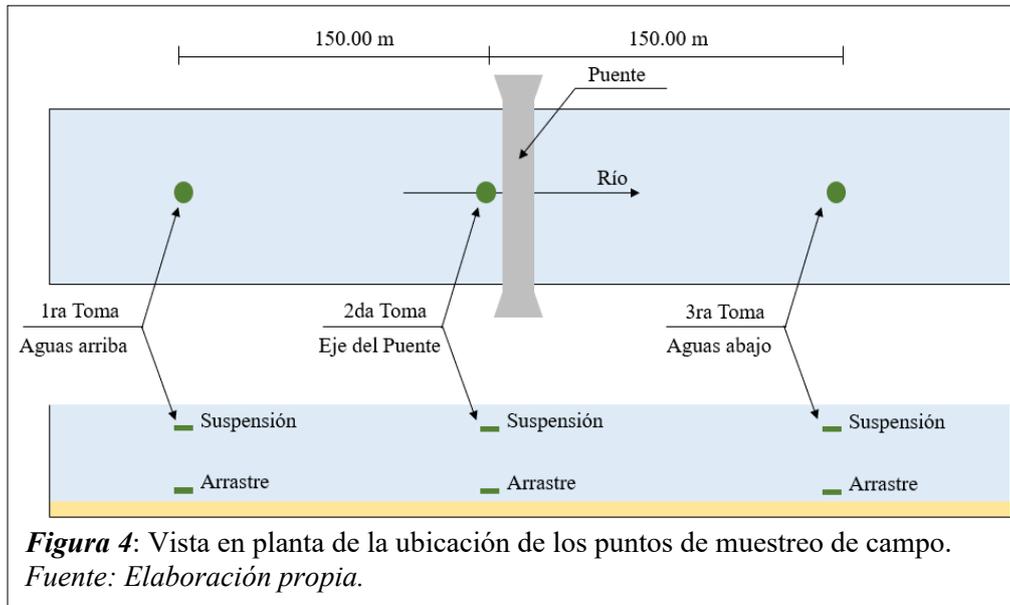
Figura 2: Vista de los puentes Pucalá (izquierda) y Monsefú – Éten (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

Los trabajos de campos consistieron en extraer muestras de sedimentos por arrastre y suspensión en el río Chancay en las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten haciendo uso de muestreadores manuales del tipo Helley – Smith (tal y como se indica en la figura 3) y se obtuvo un total de 1536 muestras de sedimentos por puente, 768 por arrastre y 768 por suspensión realizadas en las inmediaciones de cada puente. El criterio para la elección de la misma cantidad de muestreo respecto al tipo de sedimentos consistió en que ambos tipos de materiales por ser de granulometría finas a ligeramente gruesas tienden a mantener una proporción de 50% respecto al total del caudal sólido. Esto se verificó inicialmente en unos muestreos preliminares durante un mes antes del inicio de la ejecución de la investigación.



Figura 3: Muestreadores manuales tipo Helley – Smith empleados para las mediciones del transporte de sedimentos en la sección del río Chancay.
Fuente: Elaboración propia.

Cada inspección comprendió la extracción de sedimentos tanto de arrastre como de suspensión en 3 puntos de estudio según se como se muestra en la figura 4, es decir en el eje de cada puente y a 150 metros aguas arriba y aguas abajo de las estructuras en mención. Por lo tanto, por cada inspección diaria se obtuvieron 6 muestras en las inmediaciones puente Pucalá y 6 muestras en las cercanías del puente Monsefú – Eten, haciendo un total por semana de 18 muestreos en cada puente.



Efectuadas las extracciones de sedimentos se realizaron los ensayos tomando como referencia el procedimiento realizado por la investigación de Vasquez Idrogo, J. F., Guerrero Millones, A. M., & Sotomayor Nunura, G. d. S. (2018), pues indican que se debe realizar un análisis granulométrico por tamizado, un análisis granulométrico por sedimentación, determinación del peso específico para partículas sólidas y la cuantificación de concentración de sedimentos. Los ensayos efectuados tanto para muestras por arrastre como de suspensión fueron de gran significación para conocer el tipo de material del cauce y sus principales características, dichos procedimientos se realizaron en el laboratorio de ensayos y materiales de la Universidad Señor de Sipán (ver figura 5). Una vez elaborados los ensayos mencionados, se realizó posteriormente un levantamiento topográfico cuyo estudio permitió conocer las características geométricas de la sección del río.



Con el objetivo de seleccionar la ecuación de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión de mejor ajuste al río Chancay acorde a los puntos de estudio y validar dichos resultados con las mediciones en el río, se efectuó un análisis que permitió conocer cuál era la ecuación con menor porcentaje de error, luego de conocida la fórmula empírica por arrastre y por suspensión de mejor ajuste en el río de estudio se pudo estimar el transporte total de sedimentos en kg/m.s. Las fórmulas empíricas empleadas fueron las propuestas por Meyer – Peter & Müller (ver figura 6), Duboys & Straub (ver figura 7), Schoklistch (ver figura 8), Levi (ver figura 9) y Yalin (ver figura 10) para el transporte por arrastre, mientras que para las ecuaciones de transporte por suspensión se emplearon las ecuaciones propuestas por Brooks (ver figura 11), Chang, Simons & Richardson (ver figura 12) y Bagnold (ver figura 13). Las técnicas de recolección de datos usadas fueron la observación, el análisis de documentos y los ensayos de laboratorio de suelos. El uso de la observación permitió analizar el transporte de sedimentos por arrastre y suspensión en el río Chancay – Lambayeque en las inmediaciones de los puentes Pucalá y Monsefú – Eten y de esta manera estimar la producción de sedimentos en kg/m.s y a la vez determinando el caudal sólido del río en m³/s.

- Densidad relativa de las partículas sumergidas:	$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$
- Rugosidad debido a las partículas:	$n' = \frac{(D_{90})^{1/6}}{26}$
- Numero adimensional de Shields a τ_0 :	$\tau_* = \frac{Rh.S}{\Delta.D}$
- Cuantificación del transporte de sedimentos:	Si $\tau_* > 1$
$g_B = 8\gamma_s g^{1/2} \Delta^{1/2} D_m^{3/2} \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{3/2} \tau_* - 0.047 \right]^{3/2}$ $g_B = \frac{8\gamma_s g^{1/2} (R.S)^{3/2} \left(\frac{n'}{n} \right)^{9/4}}{\Delta}$	

Figura 6: Ecuación y parámetros de Meyer – Peter & Müller.
Fuente: Elaboración propia.

- Densidad relativa de las partículas sumergidas:	$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$
- Esfuerzo cortante crítico:	$\tau_c = 41.8D^{0.82} - 0.017Ln(454D)$
- Número adimensional de Shield:	$\tau_*c = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D_{50}}$ $\tau_* = \frac{Rh.S}{\Delta.D}$
- Cuantificación del transporte de sedimentos:	
$g_B = 0.01003(\gamma_s - \gamma)^2 D^{1.25} \tau_* (\tau_* - \tau_*c)$ ó $g_B = 0.01003(\gamma_s - \gamma)^2 D^{1.25} \tau_*$	
$\tau_* > 20\tau_*c$	

Figura 7: Ecuación y parámetros de Duboys & Straub.
Fuente: Elaboración propia.

- Densidad relativa de las partículas sumergidas:

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

- Cuantificación del transporte de sedimentos:

$$T_F = 2500S^{1/3} [qS^{7/6} - 2.351 \times 10^{-5} \Delta^{5/3} D^{7/18}] \quad (Kg/s - m)$$

Figura 8: Ecuación y parámetros de Schoklistch.

Fuente: Elaboración propia.

- Diámetro máximo:

$$D_{max} = D_m \cdot 1.276^{3.0923}$$

- Velocidad crítica del escurrimiento:

$$\frac{d}{D_m} \geq 60 \quad U_c = 1.4 \sqrt{g \cdot D_m} \left(\frac{D_{max}}{D_m} \right)^{1/7} \ln \left[\frac{d}{7 \cdot D_m} \right]$$

$$\frac{d}{D_m} \leq 60 \quad U_c = 1.4 \sqrt{g \cdot D_m} \left(\frac{D_{max}}{D_m} \right)^{1/7} \left[1 + \ln \sqrt{\frac{d}{7 \cdot D_m}} \right]$$

- Cuantificación del transporte de sedimentos:

$$g_B = \frac{0.002 \gamma_s \cdot U^3 (U - U_c)}{g^{3/2} (d \cdot D_m)^{1/4}}$$

Figura 9: Ecuación y parámetros de Levi.

Fuente: Elaboración propia.

- Densidad relativa de las partículas sumergidas:

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

- Número adimensional de la partícula:

$$D_* = D [g \Delta / v^2]^{1/3}$$

- Números adimensionales de Shields:

$$\tau_{*c} = \frac{0.2196}{D_*} + 0.077 \exp \left[- \left(\frac{30.35}{D_*} \right)^{0.563} \right] \quad S_y = \frac{\tau_* - \tau_{*c}}{\tau_{*c}}$$

- Fórmula adimensional según Yalin:

$$a_y = 2.5 \tau_{*c} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s} \right)^{0.4}$$

- Velocidad al cortante del flujo:

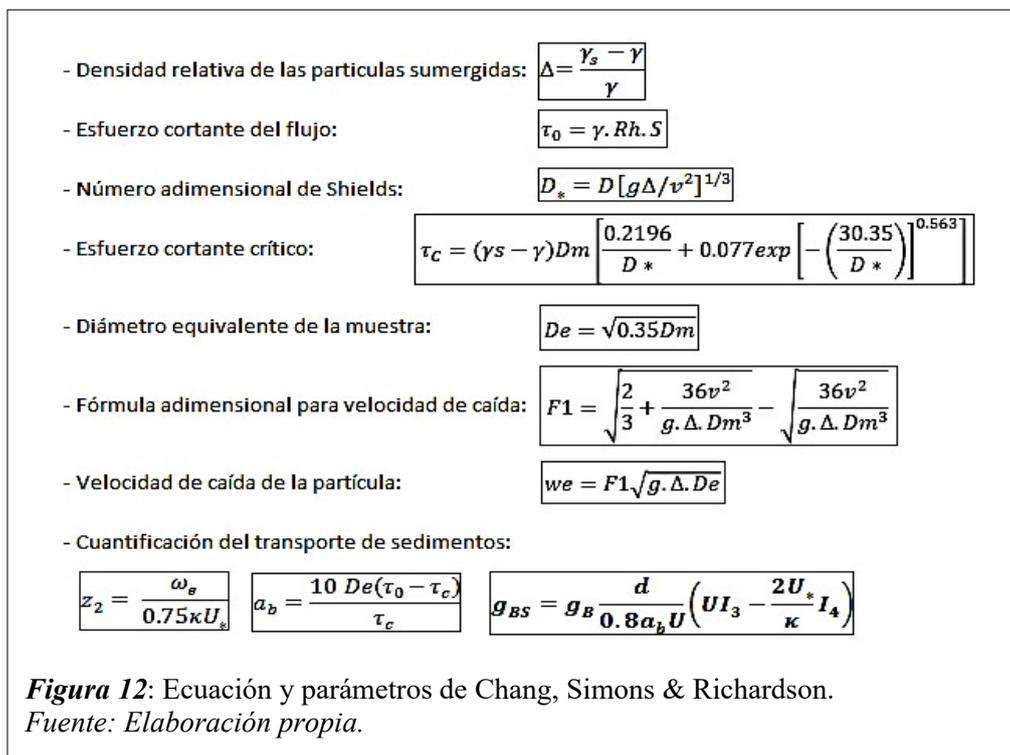
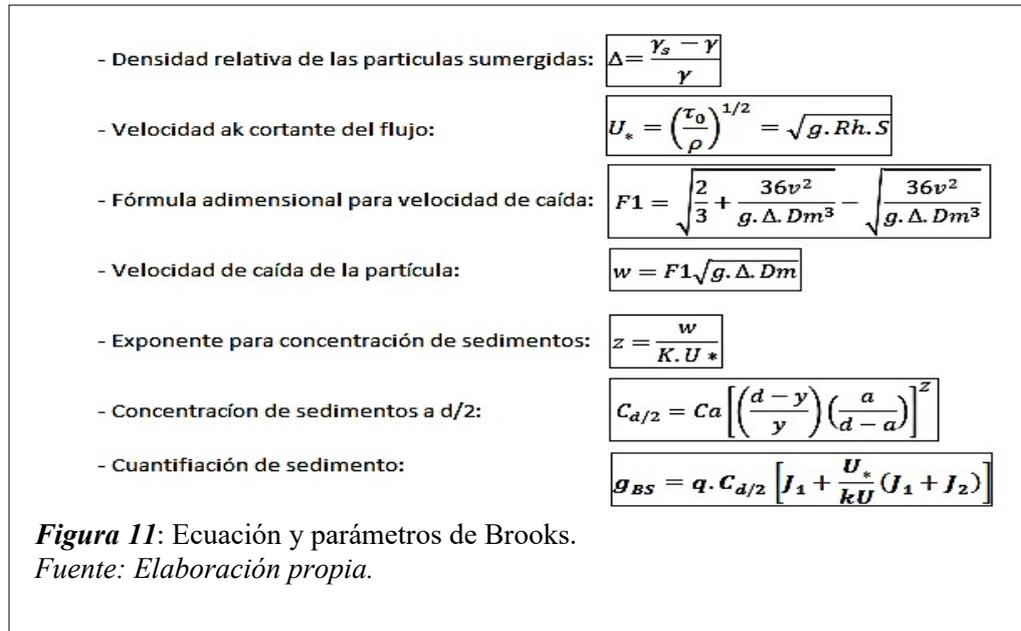
$$U_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2} = \sqrt{g \cdot R h \cdot S}$$

- Cuantificación del transporte de sedimentos:

$$g_B = 0.635 s_y D U_* (\gamma_s - \gamma) \left[1 - \frac{1}{a_y s_y} \ln(1 + a_y s_y) \right]$$

Figura 10: Ecuación y parámetros de Yalin.

Fuente: Elaboración propia.



- Densidad relativa de las partículas sumergidas:	$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$
- Esfuerzo cortante del flujo:	$\tau_0 = \gamma \cdot Rh \cdot S$
- Diámetro equivalente de la muestra:	$De = \sqrt{0.35 Dm}$
- Fórmula adimensional para velocidad de caída:	$F1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g \cdot \Delta \cdot Dm^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g \cdot \Delta \cdot Dm^3}}$
- Velocidad de caída de la partícula:	$we = F1 \sqrt{g \cdot \Delta \cdot De}$
- Cuantificación del transporte de sedimentos:	$g_{BS} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \right) \frac{0.01}{\left(\frac{we}{U} - \tan\beta \right)} \tau_0 U$

Figura 13: Ecuación y parámetros de Bagnold.
Fuente: Elaboración propia.

Entre los materiales e instrumentos empleados en el desarrollo de la presente investigación se encuentran los equipos de topografía y en lo que respecta a equipos e instrumentos de laboratorio de suelos correspondió el uso de horno, balanza calibrada, hornilla, material obtenido por muestreo del río Chancay – Lambayeque en los puntos de estudio establecidos, muestreadores de sedimentos Helley – Smith, tamices, taras metálicas, bandejas, hidrómetros, probetas, picnómetros y canastillas. De la misma manera se emplearon formatos y guías para el estudio y ensayos de suelos, formatos para el estudio topográfico, inspecciones técnicas en los puentes Pucalá y Monsefú – Eten para la obtención de las muestras de sedimentos. Como guía documental para la realización ensayos se tuvo la norma técnica peruana (NTP), siguiendo el proceso establecido en cada una de ellas, teniendo como referencia la norma NTP 339.128 (Análisis granulométrico por tamizado y Análisis granulométrico por sedimentación), NTP 339.131 (Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas de un suelo, NTP 400.021 (Peso específico y absorción de agregados gruesos) y la norma ASTM D 2216 (Contenido de humedad).

3. Resultados

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos en cada procedimiento mencionado, los cuales conllevan a determinar cuáles son las ecuaciones de mejor ajuste al río Chancay por arrastre y suspensión, así como determinar los aportes de caudal sólido en m³/s, para lo cual como se indicó previamente se realizó el levantamiento topográfico del lugar para la determinación de los parámetros hidráulicos obteniéndose los resultados sintetizados en la tabla 1 y tabla 2:

Tabla 1

Parámetros hidráulicos promedio de las secciones del Río Chancay - puente Pucalá.

Punto	Y (m)	A (m ²)	P (m)	Rh (m)	S (%o)	"n"	Q (m ³ /s)	V (m/s)	N ^o Froude	Tipo de flujo
Eje puente	2.48	164.95	73.05	2.26	3.45	0.081	205.87	1.25	0.25	Subcrítico
A. Arriba	2.25	165.22	76.18	2.17	3.45	0.082	198.29	1.20	0.26	Subcrítico
A. Abajo	2.11	165.14	82.13	2.01	3.45	0.077	200.68	1.21	0.27	Subcrítico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Parámetros hidráulicos promedio de las secciones del Rio Chancay - puente Monsefú - Eten.

Punto	Y (m)	A (m ²)	P (m)	Rh (m)	S (‰)	"n"	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Nº Froude	Tipo de flujo
Eje puente	2.87	161.32	105.87	1.52	3.15	0.064	187.33	1.25	0.24	Subcrítico
A. Arriba	2.91	162.15	108.59	1.49	3.15	0.061	194.91	1.20	0.22	Subcrítico
A. Abajo	2.80	159.48	107.88	1.48	3.15	0.062	187.35	1.21	0.23	Subcrítico

Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos realizados por medio del análisis granulométrico por tamizado (ver figura 14 y figura 15), peso específico de la muestra (ver tabla 3) y análisis granulométrico por sedimentación por medio del hidrómetro (ver figura 16) y velocidad de caída de la partícula para los tramos de estudio que conllevaron a obtener los valores para cada una de las muestras analizadas.

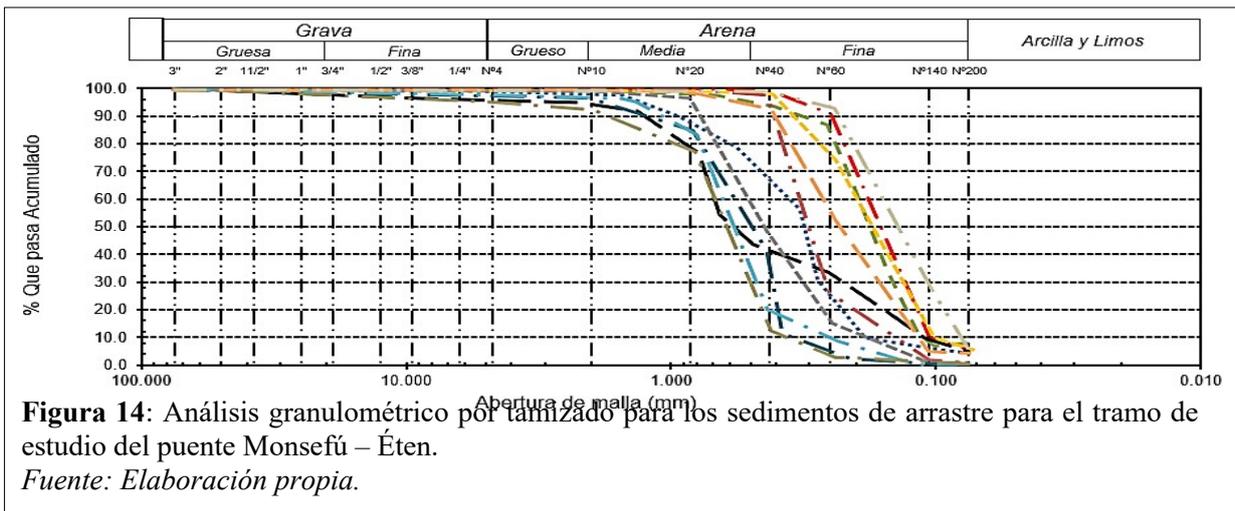


Figura 14: Análisis granulométrico por tamizado para los sedimentos de arrastre para el tramo de estudio del puente Monsefú – Eten.

Fuente: Elaboración propia.

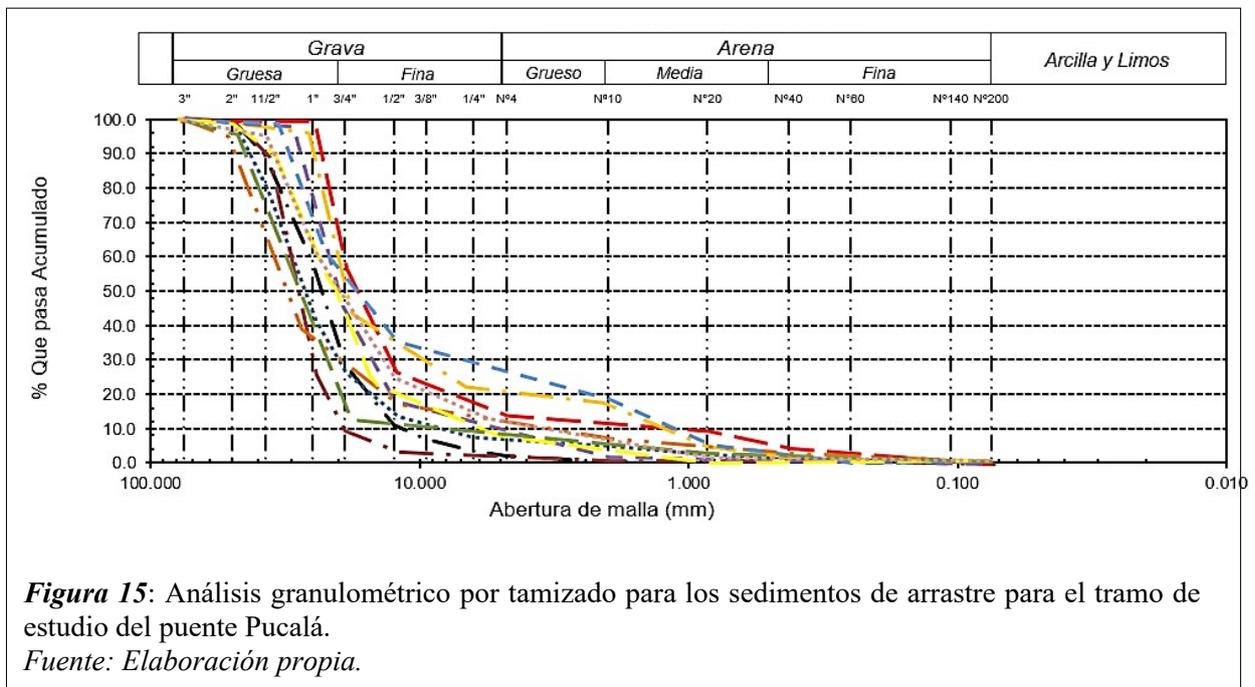


Figura 15: Análisis granulométrico por tamizado para los sedimentos de arrastre para el tramo de estudio del puente Pucalá.

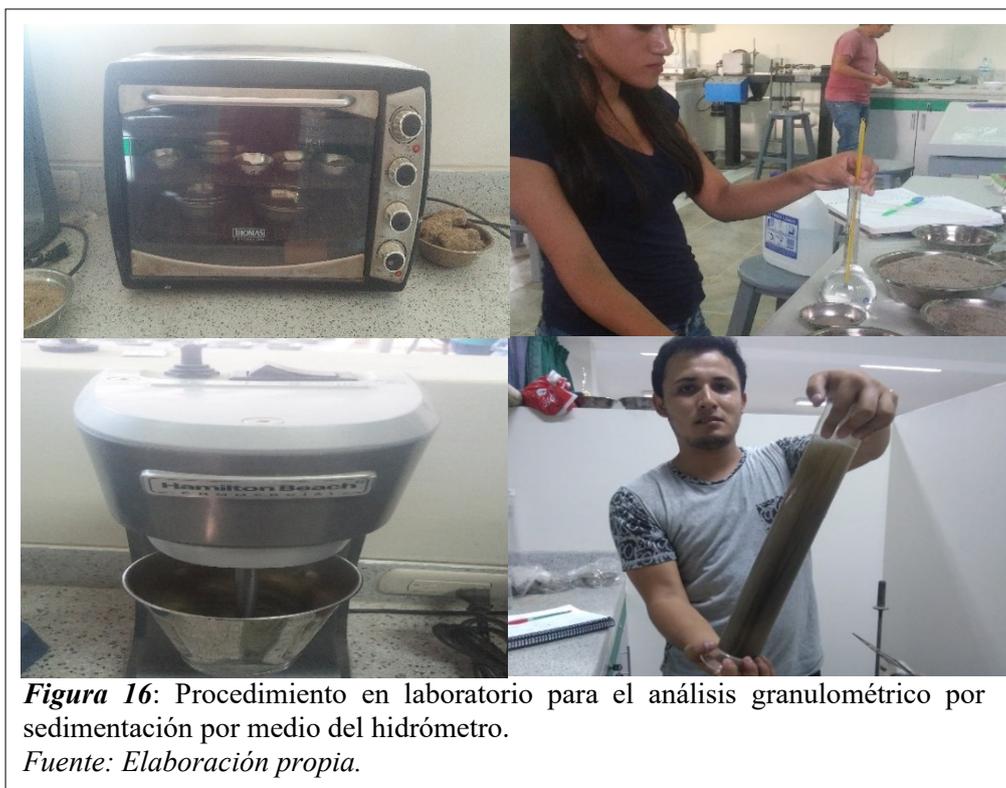
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3

Valores de peso específico promedio en g/cm³, para las muestras extraídas por arrastre y suspensión.

Puente Pucalá		Puente Monsefú - Eten	
T.S.Arrastre	T.S.Suspensión	T.S.Arrastre	T.S.Suspensión
2.67	2.51	2.72	2.64

Fuente: Elaboración propia.



El transporte de sedimentos se estimó en unidades de kg/m.s para el sedimento transportado por arrastre empleando las ecuaciones empíricas de Meyer, Peter y Müller; Duboys y Straub; Schoklistch, Yalin y la de Levi para cuantificar el arrastre de la capa de fondo y para el transporte de suspensión se emplearon las ecuaciones de Brooks, Chang Simons y Richardson y la de Bagnold. Los valores obtenidos por las ecuaciones por arrastre se sumaron con los valores obtenidos de las ecuaciones de suspensión, para poder realizar la comparación con lo cuantificado en campo el cual son valores de transporte total (arrastre y suspensión). Así mismo se determinó el transporte de sedimentos existente en el tramo estudiado los cuales serán contrastados con los valores obtenidos de las ecuaciones empíricas y finalmente se compararon con los caudales máximos de la estación hidrométrica Racarumi de la cuenca Chancay – Lambayeque para el período de medición y estimación desde Enero del 2018 hasta Diciembre del 2018 (ver figura 17 y figura 18) donde se puede apreciar que los resultados son muy prometedores respecto a la medición en campo y a los valores estimados con las ecuaciones.

Tabla 4

Transporte de sedimento total (arrastre y suspensión) cuantificado en campo – Puente Pucalá.

Ubicación	Porcentajes del caudal sólido respecto al caudal del río				
	10%	20%	30%	40%	50%
Eje puente	0.805	1.052	1.601	1.850	2.105
A. Arriba	0.796	0.990	1.523	1.825	2.037
A. Abajo	0.812	1.102	1.724	1.901	2.321

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior muestra la cuantificación existente del transporte de sedimentos para las inmediaciones del Puente Pucalá (ver tabla 4). Para el caso de las inmediaciones del Puente Monsefú – Éten se muestran los resultados a continuación (ver tabla 5).

Tabla 5

Transporte de sedimento total (arrastre y suspensión) cuantificado en campo - Puente Monsefú – Éten

Ubicación	Porcentajes del caudal sólido respecto al caudal del río				
	10%	20%	30%	40%	50%
Eje puente	1.702	2.115	2.709	3.105	3.711
A. Arriba	1.659	2.052	2.625	2.968	3.623
A. Abajo	1.925	2.324	2.834	3.452	3.952

Fuente: Elaboración propia.

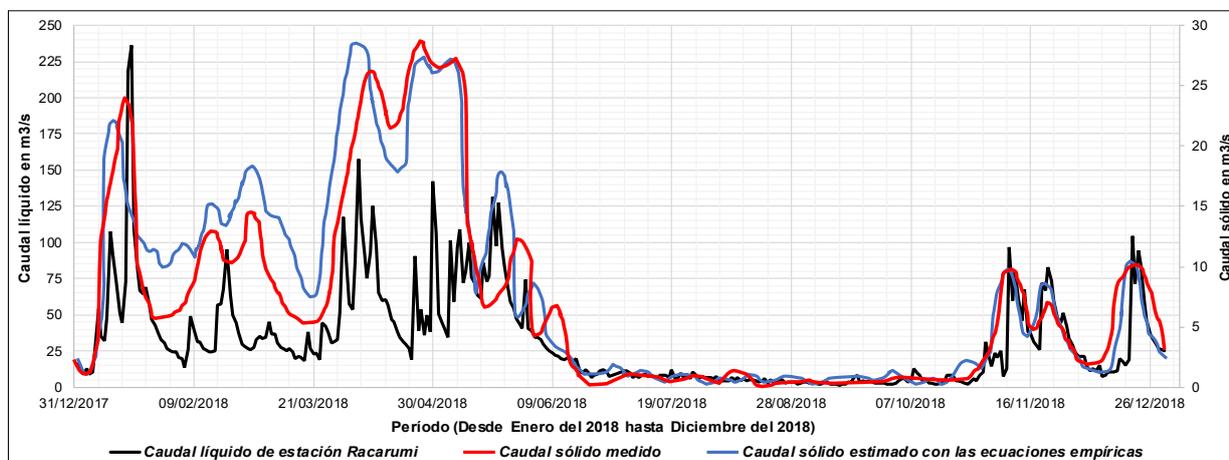


Figura 17: Comparación del caudal líquido y sólidos para el tramo del puente Monsefú - Éten.

Fuente: Elaboración propia.

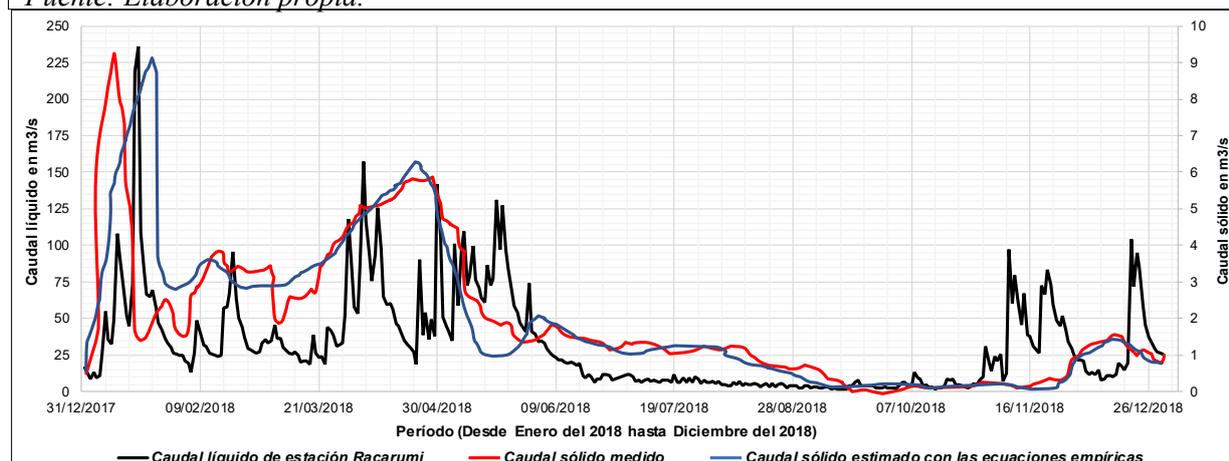
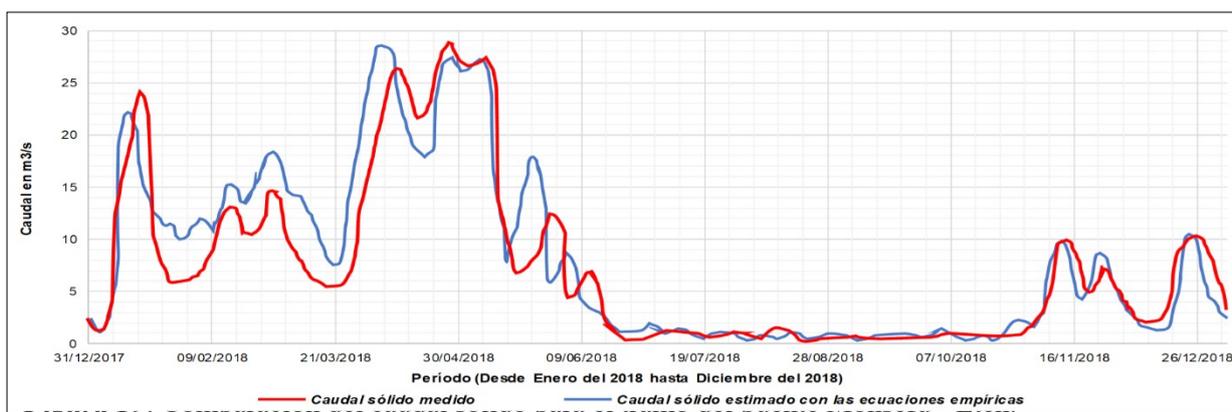


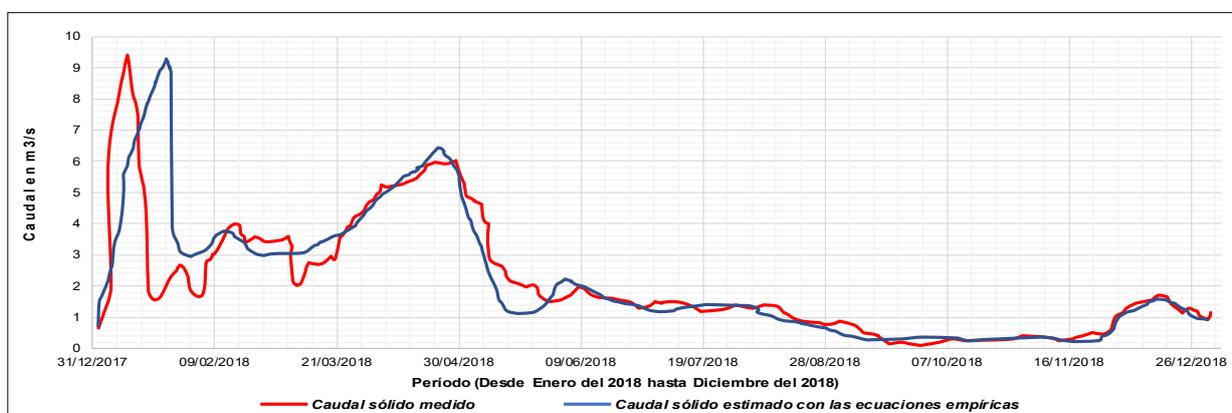
Figura 18: Comparación del caudal líquido y sólidos para el tramo del puente Racarumi.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la comparación de los caudales sólidos (ver figura 19 y 20) para la validación de las ecuaciones tomando en cuenta la medición realizada en campo se creyó conveniente emplear el criterio de eficiencia de Nash - Sutcliffe ó también llamada prueba “E” así como los valores de ajuste de la misma medida de bondad de ajuste que es muy empleado en el análisis estadístico de la hidrología superficial y subterránea y válido para cualquier escala de tiempo (ver figura 21); con lo cual se obtuvo un valor de $E = 0.696$ para el tramo del puente Monsefú – Éten y $E = 0.725$ para el tramo del puente Pucalá indicándonos que son valores muy buenos según el criterio de eficiencia pues dicho rango se encuentra entre 0.60 y 0.80 con lo que finalmente se pueden aceptar los resultados.



Fuente: Elaboración propia.



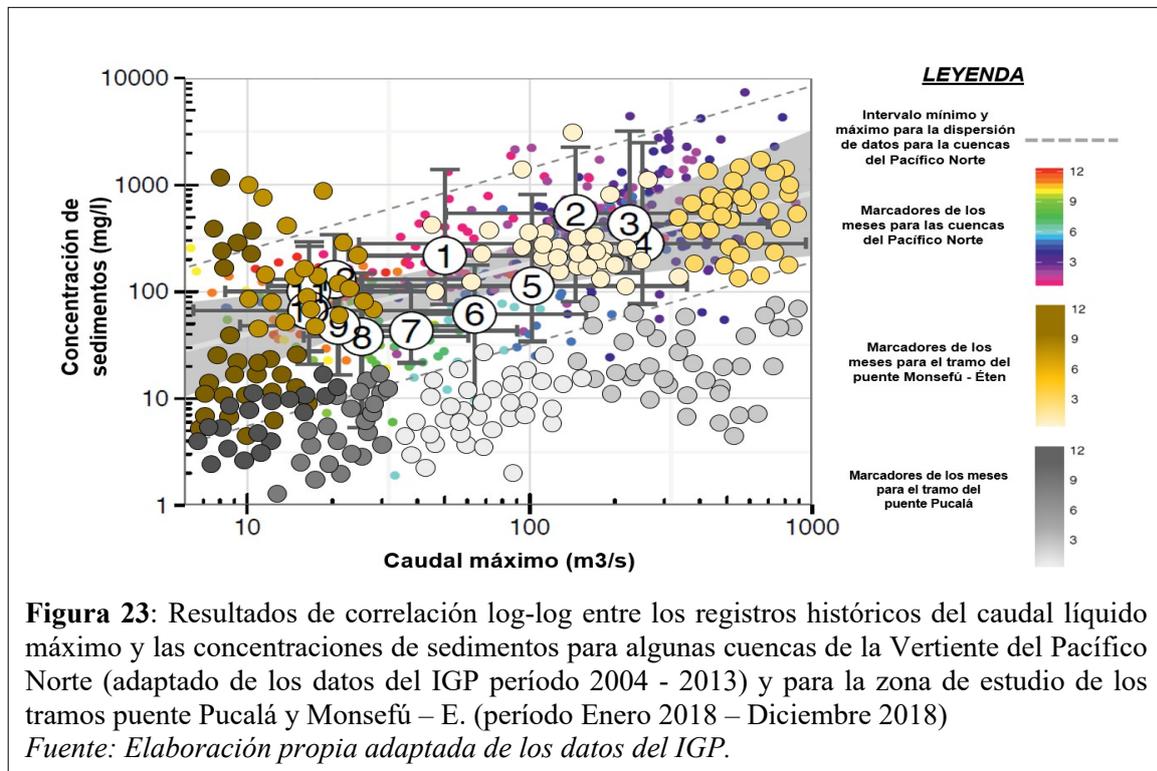
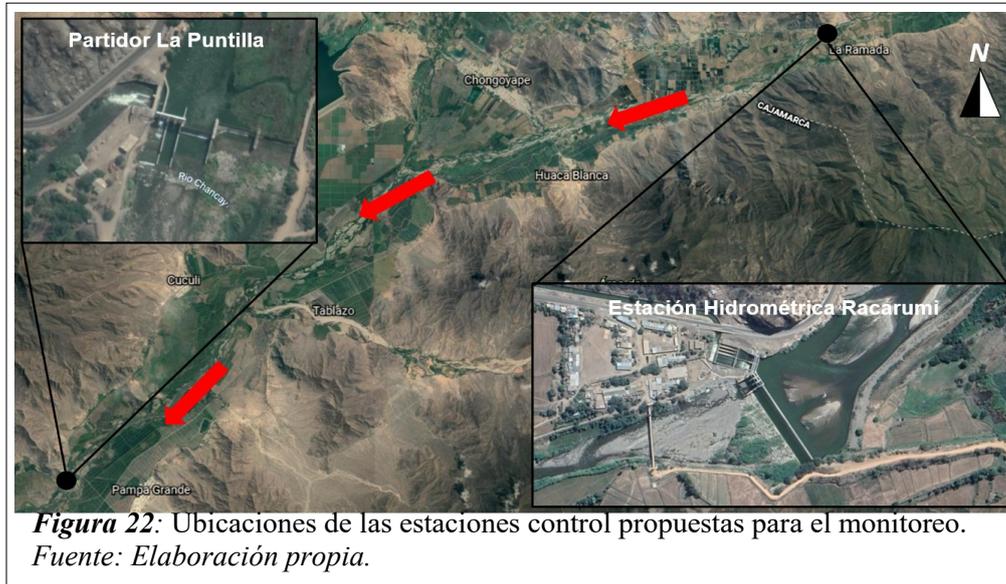
Fuente: Elaboración propia.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 -0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Figura 21: Criterio “E” para el análisis y validación de ajuste para valores observados (medibles) versus valores generados (estimados).
Fuente: Elaboración propia.

Para una mayor validez de los resultados y ampliar los registros del transporte de sedimentos tanto de arrastre como de suspensión a nivel de toda la cuenca Chancay – Lambayeque se sugiere la instalación de estaciones control en las zonas indicadas puesto que son las estaciones de monitoreo actualizadas que se dispone de información hidrométrica a nivel diario (ver figura 22).



Finalmente se determinaron las concentraciones de sedimentos en los tramos de estudio a partir de

las mediciones de campo del período 2018 (ver figura 23) y se compararon con los resultados del IGP según lo mencionado por su investigación de Morera, S. (2014). Este aspecto es muy importante

puesto que en la actualidad sólo se han estudiado algunas cuencas del norte del Pacífico dentro de las cuales no incluye la cuenca Chancay - Lambayeque (ver figura 24).

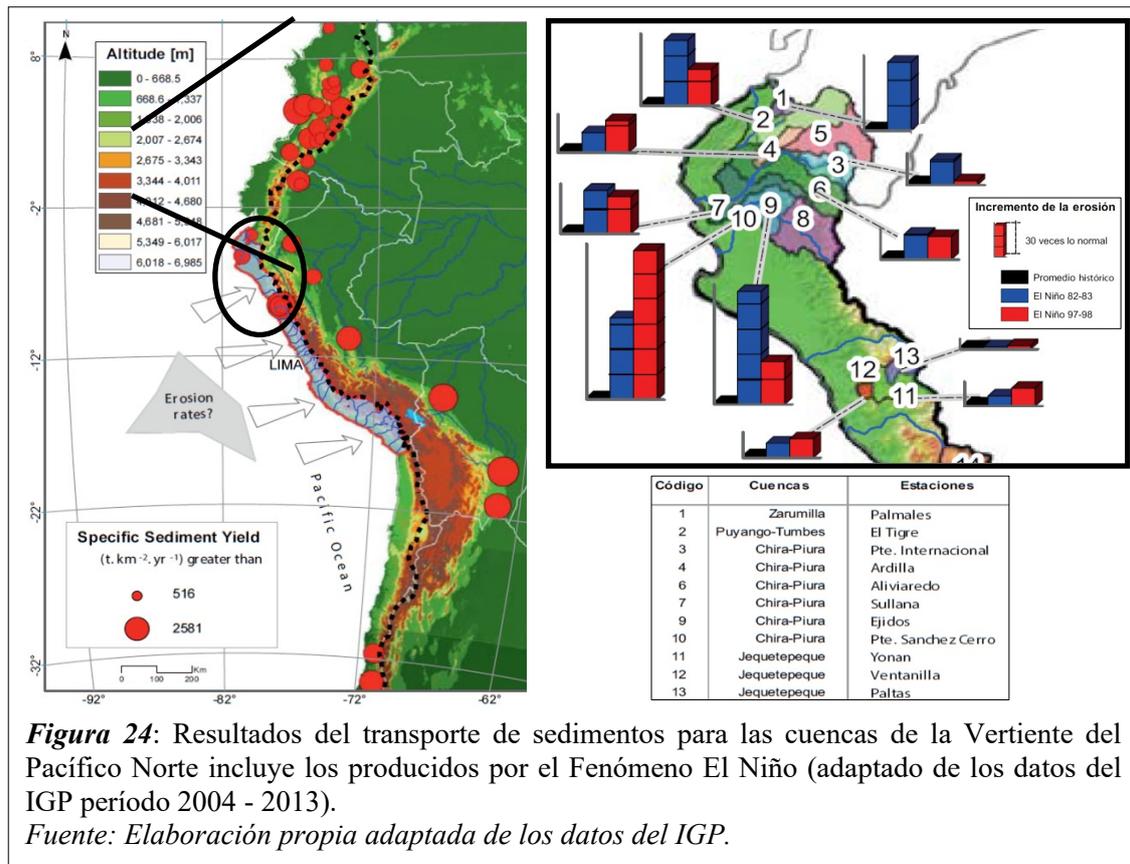


Figura 24: Resultados del transporte de sedimentos para las cuencas de la Vertiente del Pacífico Norte incluye los producidos por el Fenómeno El Niño (adaptado de los datos del IGP período 2004 - 2013).

Fuente: Elaboración propia adaptada de los datos del IGP.

4. Discusión

Según lo mostrado en las figuras 14, 15, 19 y 20 en los resultados de la presente investigación se puede decir que el aumento y/o disminución del caudal líquido con respecto al transporte de sedimentos incide en forma directa en la distribución de sedimentos a lo largo de los tramos estudiados, esto se sustenta en publicación de Xin Yu, Haoming Fan, Liquan Liu, & Jing Chen (2019), donde además dicho estudio citado analiza las relaciones entre el proceso de cambio de volumen de agua para el transporte de sedimentos y sus factores de impacto para las condiciones críticas del transporte de sedimentos. También es importante analizar la granulometría del material en el caso de que el río se ubique aguas debajo de una presa y ésta pueda contribuir en un incremento progresivo del transporte de sedimentos.

Respecto a los resultados en cuanto a la comparación del caudal líquido y sólidos estimados con las mediciones y ecuaciones Beckers, F., Heredia, A., Noack, M., Nowak, W., Wieprecht, S., & Oladyshkin, S. (2020) en su respectivo estudio recomiendan realizar también un análisis bajo un enfoque bayesiano estocástico para calibrar y validar modelos morfodinámicos de transporte de sedimentos y para cuantificar incertidumbres paramétricas con el fin de aliviar las limitaciones de los procedimientos de calibración. Otro aspecto a considerar en esta investigación son los procesos de transporte de sedimentos desde las laderas hasta las cuencas profundas pues así los señalan Manta, K., Rousakis, G., Anastakis, G., Lykousis, V., Sakellariou, D., & Panagiotopoulos, I. P. (2019), dichos procesos deberían evaluarse no sólo a nivel de tramos de ríos sino a nivel de toda una cuenca, sin embargo, para el caso de estudio considerado se requiere un sistema de medición de sedimentos a nivel diario.

Se puede mencionar además que Moreira, D., & Simionato, C. G. (2019) y Horvat, M., & Horvat, Z. (2020), destacan la importancia de realizar una simulación numérica que permitan analizar cuantitativamente el transporte de sedimentos y el caudal líquido, sin embargo, para lograr tal fin se requieren mayor cantidad de datos de medición de un rango mayor al estudiado y en mayor longitud de tramos de estudio como lo indican Yu, B. Y., Wu, P., Sui, J., Ni, J., & Whitcombe, T. (2020) en su investigación realizada al río Huai de China que lo han realizado por más de 58 años, a pesar de ello los resultados obtenidos muestran una buena aceptación en cuanto a la validación de los valores de las ecuaciones empíricas versus las mediciones de campo.

Se sabe que el caudal sólido es un porcentaje del caudal del río, esto se determinó para distintos porcentajes del caudal del río según los tramos de estudio en un rango de 10% hasta el 50% sirviendo para comparar con cada uno de ellos los valores obtenidos por las ecuaciones empíricas (ver tabla 4 y 5), según se muestra se puede observar cómo va aumentando la cuantificación de transporte de sedimentos sobre todo entre los meses de Enero a fines de Abril, dicho procedimiento se sustenta en la investigación realizada por Vasquez Idrogo, J. F., Guerrero Millones, A. M., & Sotomayor Nunura, G. d. S. (2018) el cual fue realizado en una cuenca muy cercana a la de esta investigación.

5. Conclusiones

Las características hidráulicas y granulométricas del transporte de sedimentos del río Chancay – Lambayeque en los tramos de estudio obtenidas indican que existe una alta concentración de sedimentos con un mayor énfasis en las inmediaciones del puente Monsefú - Éten esto se debe a dos factores principales: la pendiente muy baja y el aumento considerable del caudal desde Enero a Abril, pues en los meses de estiaje el transporte de sedimentos disminuye pero queda depositado en varios tramos del río estudiado.

Para las inmediaciones del puente Pucalá el sedimento analizado corresponde a gravas y arenas pobremente graduadas, obteniendo también limos pero en menor porcentaje, mientras que para el tramo del puente Monsefú – Éten el sedimento analizado corresponde a arenas pobremente graduadas tal y como se sustentan en las curvas granulométricas presentadas en los resultados de la investigación.

Las ecuaciones de mejor ajuste se seleccionaron, teniendo en cuenta cual era la que tenía menor porcentaje de variación con respecto a lo cuantificado en campo, concluyendo que para las inmediaciones del puente Pucalá, en el transporte por arrastre la ecuación que mejor se ajusta es la de Schoklistch, mientras para el transporte en suspensión la ecuación de Brooks es la que resulta de mejor ajuste. Para las inmediaciones del puente Monsefú – Éten para calcular el transporte por arrastre la ecuación de Meyer – Peter y Müller se ajusta correctamente para todas las variaciones y para el transporte de sedimento en suspensión la ecuación que resulta de mejor ajuste es la de Chang, Simons – Brooks, siendo los resultados obtenidos por cada una de las ecuaciones muy confiables y válidas.

En cuanto a los caudales sólidos medidos y a los obtenidos con las ecuaciones empíricas se puede apreciar que al aplicar el criterio de eficiencia de Nash - Sutcliffe los resultados para el tramo del puente Monsefú – Éten y para el tramo del puente Pucalá indican en ambos que son valores muy buenos con lo que finalmente se pueden validar los resultados y concluir que las ecuaciones empíricas son aceptables para la zona en estudio, sin embargo se propone dos zonas de medición del transporte de sedimentos en lugares estratégicos para un mayor control y monitoreo del transporte de sedimentos en la cuenca Chancay – Lambayeque a nivel diario, pues como se observa en los resultados de las concentraciones de sedimentos éstas pueden llegar hasta 3000 mg/l con lo que se puede deducir que el río presenta grandes variaciones y puede provocar sedimentación en importantes estructuras hidráulicas de la Región Lambayeque.

6. Referencias

- Beckers, F., Heredia, A., Noack, M., Nowak, W., Wieprecht, S., & Oladyskhin, S. (2020). Bayesian Calibration and Validation of a Large-Scale and Time-Demanding Sediment Transport Model. *Water Resources Research*, 56(7), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2019WR026966>
- Haun, S., Rütther, N., Baranya, S., & Guerrero, M. (2015). Comparison of real time suspended sediment transport measurements in river environment by LISST instruments in stationary and moving operation mode. *Flow Measurement & Instrumentation*, 41, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.009>
- Horvat, M., & Horvat, Z. (2020). Sediment transport and bed evolution model for complex river systems. *Environmental Monitoring & Assessment*, 192(4), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8100-1>
- Manta, K., Rousakis, G., Anastasakis, G., Lykousis, V., Sakellariou, D., & Panagiotopoulos, I. P. (2019). Sediment transport mechanisms from the slopes and canyons to the deep basins south of Crete Island (southeast Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 39(4), 295–312. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00575-1>
- Medina Rosell, J. A., Mejía Marcauzco, J. A., & Becerra Pajuelo, A. F. (2019). Mecánica del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente Modelo de Estela. *Revista Anales Científicos*. Obtenido de <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/1379>
- Moreira, D., & Simionato, C. G. (2019). Modeling the Suspended Sediment Transport in a Very Wide, Shallow, and Microtidal Estuary, the Río de la Plata, Argentina. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10), 3284–3304. <https://doi.org/10.1029/2018MS001605>
- Morera, S. (2014). Erosión y transporte de sedimentos durante eventos El Niño a lo largo de los Andes occidentales. *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, Instituto Geofísico del Perú. Julio, 1, 7, 4-7. http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/Divulgacion_PPR_El_Nino_IGP_201712.pdf
- Vasquez Idrogo, J. F., Guerrero Millones, A. M., & Sotomayor Nunura, G. d. S. (2018). Comparación de los modelos de transporte de sedimentos en fondo en las inmediaciones del puente Motupe. *Revista Científica Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*. Obtenido de <http://revistas.uss.edu.pe/index.php/ING/article/view/975>
- Wu, T., & Qin, J. (2020). Influence of Flow and Sediment Transport Processes on Sedimentation in Groyne Fields. *Journal of Coastal Research*, 95, 304–308. <https://doi.org/10.2112/SI95-059.1>
- Xin Yu, Haoming Fan, Liquan Liu, & Jing Chen. (2019). Calculation of Water Volume for Sediment Transport in the Sediment-laden River of the Main Stream of Liaohe River, Northern China. *Nature Environment & Pollution Technology*, 18(4), 1143–1155
- Yu, B. Y., Wu, P., Sui, J., Ni, J., & Whitcombe, T. (2020). Variation of Runoff and Sediment Transport in the Huai River – A Case Study. *Journal of Environmental Informatics*, 35(2), 138–147. <https://doi.org/10.3808/jei.202000429>