

Analysis of vertical flow velocity and suspended sediment concentration profiles in Tumbes River during El Niño and La Niña events

Renzo Dampier Mendoza Sulcaray, Eng.¹, Roberto Luis Campaña Toro, MSc², Elisa Natalia Armijos Cárdenas, PhD.³, and Sergio Byron Morera Julca, PhD⁴

^{1,2}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, rmendozas@uni.pe, rcampana@uni.edu.pe

^{3,4}Instituto Geofísico del Perú, Perú, earmijos@igp.gob.pe, smorera@igp.gob.pe

Abstract– The Tumbes region, situated in northern Peru, is impacted by the climatic phenomena of El Niño and La Niña. El Niño brings about intense precipitation, resulting in high water flows and sediment generation. Conversely, La Niña leads to precipitation deficits, resulting in lower liquid flows and sediment loads compared to El Niño. The objective of this study is to analyze the vertical flow velocity profiles and suspended sediment concentration measured at the El Tigre hydrometric station on the Tumbes River, located 50 km upstream from the Pacific Ocean estuary, during flood periods in the El Niño events of 2017 and the La Niña events of 2018.

Vertical flow velocity profiles, measured using a Doppler effect current meter, were modeled by applying the theoretical velocity distribution of the log-wake type. Parameters such as shear velocity, distance from the bed where the flow profile velocity theoretically becomes zero, and the wake parameter were adjusted.

Vertical suspended sediment concentration profiles were modeled using the theoretical distribution resulting from the parabolic-linear distribution of the fluid mixing coefficient. Parameters including mean diameter of suspended sediments and reference suspended sediment concentration near the bed were adjusted.

The study concluded that the vertical flow velocity profiles and suspended sediment concentration profiles recorded during the El Niño event of 2017 and La Niña event of 2018 reasonably matched the theoretical velocity distribution of the log-wake type and the theoretical concentration distribution of suspended sediments resulting from the parabolic-linear distribution of the fluid mixing coefficient.

Using the adjusted models, it was estimated that the mean sizes of suspended sediments calculated for the El Niño event of 2017 (62 to 132 μm) were approximately 2 times those calculated for La Niña of 2018 (25 to 67 μm), and that the reference concentrations of suspended sediment at the bed level calculated for the El Niño event of 2017 (254 to 1766 mg/l) were approximately 7 times those calculated for La Niña of 2018 (95 to 250 mg/l).

Key words– Tumbes, El Niño, La Niña, vertical velocity profiles, vertical sediment profiles.

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

Análisis de los perfiles verticales de velocidad de flujo y de concentración de sedimentos en suspensión medidos en el río Tumbes durante El Niño y La Niña

Renzo Dampier Mendoza Sulcaray, Eng.¹, Roberto Luis Campaña Toro, MSc², Elisa Natalia Armijos Cárdenas, PhD.³, and Sergio Byron Morera Julca, PhD.⁴

^{1,2}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, rmendozas@uni.pe, rcampana@uni.edu.pe

^{3,4}Instituto Geofísico del Perú, Perú, earmijos@igp.gob.pe, smorera@igp.gob.pe

Resumen– La región de Tumbes, ubicada en el norte de Perú, se ve afectada por los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña. El Niño provoca una intensa precipitación, lo que resulta en altos flujos de agua y generación de sedimentos. En cambio, La Niña conlleva déficits de precipitación, resultando en flujos líquidos más bajos y cargas de sedimentos menores en comparación con El Niño. El objetivo de este estudio es analizar los perfiles verticales de velocidad de flujo y la concentración de sedimentos en suspensión medidos en la estación hidrométrica El Tigre en el río Tumbes, ubicado a 50 km río arriba del estuario del Océano Pacífico, durante los períodos de inundación en los eventos de El Niño de 2017 y La Niña de 2018.

Los perfiles verticales de velocidad de flujo, medidos utilizando un medidor de corriente de efecto Doppler, se modelaron aplicando la distribución teórica de velocidad del tipo log-wake. Se ajustaron parámetros como la velocidad de corte, la distancia desde el lecho donde teóricamente la velocidad del perfil de flujo se vuelve cero y el parámetro de estela.

Los perfiles verticales de concentración de sedimentos en suspensión se modelaron utilizando la distribución teórica resultante de la distribución parabólico-lineal del coeficiente de mezcla de fluidos. Se ajustaron parámetros, incluyendo el diámetro medio de los sedimentos en suspensión y la concentración de sedimentos en suspensión de referencia cerca del lecho.

El estudio concluyó que los perfiles verticales de velocidad de flujo y concentración de sedimentos en suspensión registrados durante el evento de El Niño de 2017 y el evento de La Niña de 2018 coincidieron razonablemente con la distribución teórica de velocidad del tipo log-wake y la distribución teórica de concentración de sedimentos en suspensión resultante de la distribución parabólico-lineal del coeficiente de mezcla de fluidos.

Utilizando los modelos ajustados, se estimó que los tamaños medios de los sedimentos en suspensión calculados para el evento de El Niño de 2017 (62 a 132 μm) fueron aproximadamente 2 veces mayores que los calculados para La Niña de 2018 (25 a 67 μm), y que las concentraciones de sedimentos en suspensión de referencia en el lecho calculadas para el evento de El Niño de 2017 (254 a 1766 mg/l) fueron aproximadamente 7 veces mayores que las calculadas para La Niña de 2018 (95 a 250 mg/l).

Palabras clave– Tumbes, El Niño, La Niña, perfiles verticales de velocidades, perfiles verticales de sedimentos.

I. INTRODUCCIÓN

La costa norte de Perú es constantemente afectada por eventos extremos tales como El Niño y La Niña. Durante El Niño se tiene lluvias excesivas que sobrepasan 50% de la media y durante La Niña ocurre lo contrario de acuerdo con [1] y [2]. El Fenómeno El Niño causa grandes movimientos de

masa sólida que son transportados por los ríos costeros. Considerar este tipo de factores climáticos es importante para el diseño de las obras hidráulicas según [3] y [4]. Actualmente, se vienen desarrollando importantes obras de defensas ribereñas y control de inundaciones bajo la dirección de la Autoridad Nacional de Infraestructura (ANIN) en el norte del Perú en especial en el río Tumbes como prevención del evento El Niño.

Típicamente, los perfiles verticales de distribución de velocidades son representados mediante el modelo de Prandtl-Von Karman, sin embargo, acorde a [5] y [6], en canales abiertos como los ríos generalmente el modelo log-wake es mucho más realista. El modelo log-wake hace hincapié en la existencia de una región de estela por encima de la capa logarítmica del flujo la cual se ve influenciada por la turbulencia y concentraciones de sedimentos. En la región de estela la velocidad del flujo es gradualmente mayor según lo predicho por el modelo logarítmico [7]. La velocidad máxima medida suele aparecer debajo de la superficie libre a una distancia de 0,05 a 0,5 de la profundidad del flujo [8].

Típicamente, los perfiles verticales de concentración de sedimentos en suspensión son representados mediante el modelo Rouse, que se basa en la integración de la ecuación de convección-difusión de sedimentos, suponiendo que el coeficiente de mezcla del fluido varía en la vertical de forma parabólica según [9] y [10]. Sin embargo, otros perfiles empírico-teóricos emplean distintas distribuciones para el coeficiente de mezcla del fluido. Las referencias [11], [12] y [13] asumen distribuciones constante, lineal y parabólico-lineal, respectivamente. Los perfiles ajustados con la distribución parabólico-lineal proporcionan mejores resultados que los ajustados con la distribución parabólica, y estos a su vez, mejores resultados que los ajustados con las otras dos distribuciones según [1].

Varios investigadores de la región sudamericana emplearon los modelos basados en las distribuciones parabólica y/o parabólico-lineal del coeficiente de mezcla del fluido para estudiar los perfiles de concentración vertical de los sedimentos en suspensión en distintas ubicaciones y condiciones hidrológicas. En el caso de la referencia [14], en el río Magdalena, se encontró que, durante la época de crecida, el modelo basado en la distribución parabólica del coeficiente de mezcla del fluido era el más adecuado, mientras que, en época seca, el modelo basado en la distribución parabólico-lineal del coeficiente de mezcla del fluido se ajustaba mejor.

Por otro lado, en la referencia [15] en el río Amazonas, se utilizó muestreos con turbidímetro para calibrar el modelo basado en la distribución parabólica del coeficiente de mezcla del fluido, concluyendo que era esencial separar tipos de granulometría para obtener perfiles específicos. Aunque las ubicaciones y condiciones difieren, los estudios subrayan la importancia de comprender las variaciones estacionales y la granulometría para una evaluación precisa de los sedimentos en suspensión en los ríos. En la cuenca Puyango-Tumbes, hay flujo de sedimento notable, destacando la gran variabilidad del río Tumbes, especialmente durante eventos extremos como El Niño según [16] y [17].

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y el Proyecto Especial Binacional Puyango-Tumbes (PEBPT) colaboraron en el proyecto "Monitoreo y Caracterización del transporte de sedimentos durante eventos extremos El Niño en la cuenca Puyango-Tumbes". El PEBPT mejora la calidad de vida en la región Tumbes, priorizando la gestión sostenible de recursos, monitoreando caudales y protegiendo las áreas agrícolas. Aunado a este propósito, luego del 2017 se creó la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC) para reconstruir lo dañado en 13 regiones del país durante El Niño 2017; desde el año 2023 la ARCC ha sido sustituida en sus funciones por la Autoridad Nacional de Infraestructura (ANIN). El río Tumbes, esencial para el abastecimiento de agua de riego y agua con fines poblacionales, enfrenta problemas de sedimentación en el tramo final asociados a la ocurrencia de eventos de avenida extremos. El artículo identifica modelos para representar perfiles verticales de velocidades de flujo y de concentración de sedimentos en suspensión, explica y contrasta los resultados calculados y medidos en la estación El Tigre en las épocas de avenidas con la presencia de eventos extremos durante el 2017 (El Niño) y 2018 (La Niña) los cuales fortalecerá el monitoreo del río y las obras hidráulicas.

II. DATOS Y MÉTODOS

A. Zona de estudio

La estación hidrométrica "El Tigre" del río Tumbes se encuentra ubicada a 50 km aguas arriba de su desembocadura en el Océano Pacífico, a una altitud de 40 msnm en las coordenadas $80^{\circ}27'0''$ W y $3^{\circ}46'40''$ S. Políticamente la estación El Tigre se ubica en el departamento de Tumbes, provincia de Tumbes, distrito de San Jacinto, centro poblado el Higuieron (ver Fig. 1).

La cuenca binacional del río Tumbes tiene una extensión de 5 530 km², el 65% se localiza en Ecuador y el 35% en Perú según [18] y [19]. El caudal medio anual del río Tumbes asciende a 114 m³/s; durante avenidas o la ocurrencia del Fenómeno El Niño se presenta caudales máximos instantáneos de hasta 3050 m³/s y durante épocas de estiaje o presencia de la Niña 13 m³/s según [19].

B. Metodologías de Análisis

El presente estudio utilizó información recopilada por el IGP en la estación hidrométrica El Tigre durante campañas de monitoreo efectuadas en los periodos de crecida de los años

2017 y 2018 (febrero, marzo y abril). Durante el 2017 se tuvo la presencia moderada de El Niño (enero-mayo) y el 2018 la presencia débil de La Niña (enero-marzo) [20].

La información recopilada consistió en perfiles verticales de velocidades y perfiles verticales de concentraciones de material sólido suspendido. El perfilado de las velocidades se realizó empleando un correntómetro a efecto Doppler (Acoustic Doppler Current Profile, ADCP). Las concentraciones de sedimentos en suspensión se realizaron utilizando un muestreador instantáneo de sedimentos triple (lecho del fondo) y un muestreador de superficie. El muestreador de sedimentos triple, diseñado en marco del proyecto "Monitoreo y Caracterización del Transporte de Sedimentos en Suspensión y de Fondo durante crecidas o eventos extremos El Niño en las Cuencas Binacionales Puyango-Tumbes" [9], está compuesto por tres cilindros horizontales tipo clapé alineados verticalmente que realizan la toma simultánea de muestras de sedimentos a distancias de 0.15 m, 0.55 m y 0.95 m respecto del fondo del lecho de la vertical muestreado. El muestreador de superficie consistió en un muestreador cilíndrico instantáneo puntual. Las muestras recolectadas fueron llevadas al laboratorio para ser filtradas, y estos filtros fueron secados y pesados para por diferencia de pesos obtener el valor de la concentración de sedimentos.

Se obtuvieron 23 transectos y 9 perfilados verticales de concentraciones de sedimentos. Cada perfilado de sedimentos estuvo conformado por tres perfiles verticales o al menos una vertical en el canal principal.

La Fig. 2 muestra el esquema del muestreo de sedimentos adoptado en la estación El Tigre durante las campañas de 2017 y 2018. La vertical V35 está a 15 metros de la margen izquierda, seguida por V50 a 15 metros de V35, y V65 a 15 metros de V50. Empleando un muestreador triple instantáneo, en cada vertical se muestrearon 3 puntos cercanos al fondo. Asimismo, se tomó una muestra superficial en la cercanía de la orilla izquierda, dicha concentración superficial se asumió constante para toda la sección.

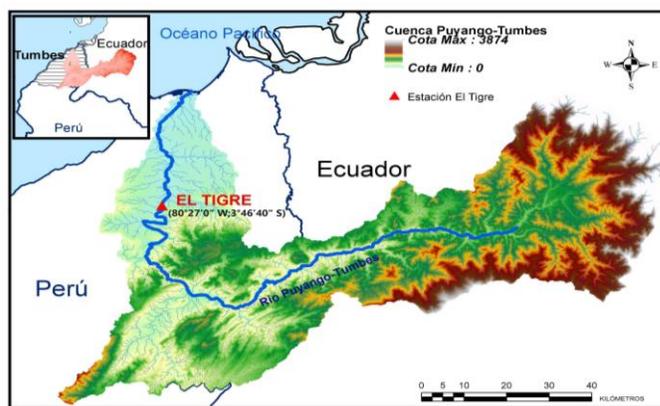


Fig. 1 Ubicación de la estación hidrométrica "El Tigre" en la cuenca Puyango-Tumbes.

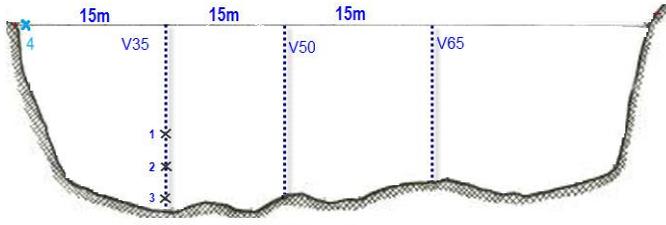


Fig. 2 Sección transversal del río Tumbes en la Estación El Tigre donde se ha realizado el muestreo o perfilado de concentraciones de sedimentos suspendidos (verticales: V35, V50 y V65) y el perfilado de velocidades. Los puntos 1, 2, 3 y 4 indican donde se tomaron las muestras de sedimentos. Las verticales están distanciadas cada 15 m desde la margen izquierda del río.

El perfil del tipo log-wake toma en cuenta la pequeña variación vertical de las velocidades a lo largo de la capa superior del perfil (entre el 20% y 100% del tirante) originada por la fuerte mezcla que se produce por los flujos secundarios de gran tamaño según [21].

Los perfiles verticales de velocidad medidos fueron contrastados con la distribución teórica del tipo log-wake. El perfil de velocidades medido abarcó mediciones realizadas entre el 5% y el 80% del tirante tomadas desde el nivel de fondo. A fin de eliminar las fluctuaciones de velocidad resultantes de las mediciones con ADCP, el perfil representativo de cada vertical se obtuvo promediando los perfiles de velocidad de las verticales adyacentes en una zona de influencia de 4 m a cada lado.

El perfil del tipo log-wake se representa mediante la expresión (1).

$$u_h = (V^*/\kappa) \ln(h/h_0) + (2\pi V^*/\kappa) \sin^2(\pi h/(2y)). \quad (1)$$

Donde: u_h (m/s) es la velocidad del flujo a una altura h (m) medida desde el fondo, V^* (m/s) es la velocidad de corte, $\kappa=0.4$ es el coeficiente de Von Karman, y (m) es el tirante del flujo, h_0 (m) es la distancia del fondo a la cual teóricamente la velocidad del perfil de flujo se hace cero, y π es el parámetro de estela del flujo turbulento.

El ajuste del perfil de velocidades teórico del tipo log-wake al perfil de velocidades medido se realizó mediante la minimización del error cuadrático total (ECT) a través de la velocidad de corte, la distancia del fondo a la cual teóricamente la velocidad del perfil de flujo se hace cero, y del parámetro de estela.

Para tal fin, el perfil de tipo log-wake se expresó como (2) acorde a [21].

$$u_h = K_1 \ln(h/y) + K_2 + K_3 \sin^2(\pi h/(2y)). \quad (2)$$

$$\text{Donde: } K_1 = V^*/\kappa, K_2 = (V^*/\kappa) \ln(y/h_0) \text{ y } K_3 = 2\pi V^*/\kappa$$

Los perfiles verticales de concentraciones de sedimentos en suspensión medidos fueron contrastados con las distribuciones teóricas reportadas en [13], resultantes de integrar la ecuación de convección-difusión utilizando la distribución parabólica, parabólica-lineal, lineal y constante

del coeficiente de mezcla del fluido. Las formulaciones empleadas son las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y (7).

Modelo Parabólico

$$C(h) = Ca((y-h)a/((y-a)*h))^z. \quad (3)$$

Modelo Parabólico-Lineal

$$C(h) = Ca((y-h)a/((y-a)*h))^z; \quad h < 0.5y; \quad (4)$$

$$C(h) = Ca(a/(y-a))^z \exp(-4z(h/y-0.5)); \quad h \geq 0.5y; \quad (5)$$

Modelo Lineal

$$C(h) = Ca(a/(h))^{3z}. \quad (6)$$

Modelo Constante

$$C(h) = Ca \exp(-6z(h-a)/y). \quad (7)$$

Dónde: $C(h)$ (mg/l) en miligramo por litro, es la concentración de sedimentos a una altura h (m) respecto del fondo, Ca (mg/l) es la concentración de referencia a una distancia a (m) del fondo, y (m) es el tirante, $a=0.05y$ (m) es el espesor de la capa de fondo donde se produce el transporte sólido de fondo y z es el parámetro de suspensión. El valor de z se obtiene de $z=w_s/(\kappa V^*)$ donde w_s (m/s) es la velocidad de caída de los sedimentos y V^* es la velocidad de corte en la vertical.

Tomando como dato de entrada las velocidades de corte obtenidas al ajustar los perfiles de velocidades medidos con el perfil teórico log-wake, y empleando el método ECT, se ajustaron los perfiles de concentraciones sólidas medidos en cada vertical a las distribuciones verticales de concentración obtenidas de integrar la ecuación de convección-difusión utilizando las distribuciones parabólicas (3), parabólica-lineal (4) (5), lineal (6) y constante (7) del coeficiente de mezcla del fluido.

Los modelos de los perfiles verticales de concentración de sedimentos fueron ajustados en función de los diámetros d_{50} de las partículas en suspensión y de las concentraciones de referencia Ca cercanas al fondo. Se aceptaron aquellos modelos con coeficientes de determinación $R^2 > 0.7$.

La velocidad de caída w_s se calculó mediante las expresiones (8) (9) y (10) según [13].

$$w_s = (Ss-1)d^2/(18\nu); \quad 1 \leq d \leq 100 \mu\text{m}. \quad (8)$$

$$w_s = (10\nu/d)((1+0.01(Ss-1)gd^3/\nu^2)^{0.5}-1); \quad 100 \mu\text{m} \leq d \leq 1000 \mu\text{m}. \quad (9)$$

$$w_s = 1.1((Ss-1)gd)^{0.5}; \quad d > 1000 \mu\text{m}. \quad (10)$$

Donde: $Ss=2.65$ es la gravedad específica de los materiales en suspensión, d (m) es el diámetro medio del material en suspensión, ν (m²/s) es la viscosidad cinemática del fluido y g (m/s²) es la aceleración de la gravedad.

III. RESULTADOS

A. Análisis de Perfiles Verticales de Velocidades

En la Fig. 3 se muestran los ajustes realizados con los perfiles de velocidad medidos durante las avenidas del 04/04/17, 17/04/18 y 18/04/18 en las verticales de estudio V35, V50 y V65.

En la TABLA I se presentan los valores de los parámetros K_1 , K_2 y K_3 para cada vertical resultantes de los ajustes según la metodología del ítem II, parte B. En la TABLA II se presenta valores de velocidad de corte, pendiente de energía, altura a la cual la velocidad se hace cero, rugosidad absoluta y parámetro de estela que se obtienen a partir de los valores de K_1 , K_2 y K_3 .

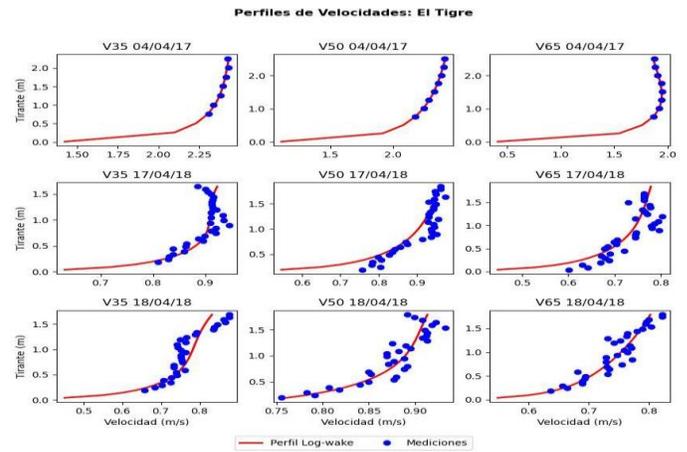


Fig. 3 Perfiles de Velocidades ajustados con el modelo log-wake en las verticales V35, V50 y V65 para las condiciones hidráulicas registradas en las fechas 04/04/2017, 17/04/2018 y 18/04/2018. También, se muestran las velocidades medidas. En el año 2017 se tuvo la presencia de El Niño y el 2018 presencia de la Niña (débil).

TABLA I.

RESULTADOS DEL AJUSTE DE LAS VELOCIDADES MEDIDAS AL PERFIL DE VELOCIDADES LOG-WAKE. DONDE: Q (m^3/s) – CAUDAL, K_1 (-) K_2 (-) Y K_3 (-) – PARÁMETROS DE AJUSTE DEL PERFIL DE VELOCIDADES, y (m) – TIRANTE EN LA VERTICAL

Fecha	Q (m^3/s)	V35				V50				V65			
		K_1 (-)	K_2 (-)	K_3 (-)	y (m)	K_1 (-)	K_2 (-)	K_3 (-)	y (m)	K_1 (-)	K_2 (-)	K_3 (-)	y (m)
18/02/2017	180	0.30	1.77	-0.33	1.90	0.23	1.47	0.01	2.44	0.22	1.48	-0.31	2.70
23/02/2017	281	0.17	1.88	-0.08	2.70	0.17	1.87	0.08	3.50	0.29	1.94	-0.73	3.23
2/03/2017	384	0.32	2.83	-0.63	3.50	0.35	2.64	-0.32	4.03	0.20	2.09	-0.75	3.77
6/03/2017	598	0.21	2.71	0.23	4.30	0.20	2.73	-0.12	4.30	0.28	2.74	-0.69	3.77
7/03/2017	687	0.43	3.46	-0.59	5.32	0.26	2.83	-0	4.79	0.33	2.96	-0.37	3.99
8/03/2017	616	0.24	2.93	-0.15	4.79	0.32	3.18	-0.65	4.52	0.42	3.02	-1.21	3.99
13/03/2017	539	0.15	2.64	-0.08	4.52	0.20	2.62	-0.37	3.99	0.25	2.16	-0.63	3.46
15/03/2017	474	0.13	2.23	0.33	3.99	0.46	3.15	-0.69	3.72	0.19	2.14	-0.49	3.19
23/03/2017	463	0.25	2.85	-0.69	3.73	0.26	2.75	-0.27	3.47	0.25	2.85	-0.7	3.73
28/03/2017	611	0.14	2.73	0.03	3.72	0.31	2.83	0.12	3.99	0.33	3.02	-0.77	3.72
1/04/2017	470	0.35	3.10	-0.46	3.99	0.15	2.69	0.11	3.99	0.27	2.11	-0.79	3.72
2/04/2017	433	0.25	2.63	-0.20	3.47	0.24	2.77	-0.48	3.47	0.20	2.15	-0.53	3.47
3/04/2017	356	0.25	2.53	-0.22	2.97	0.25	2.26	-0.5	3.5	0.24	1.88	-0.52	3.23
4/04/2017	423	0.21	2.60	-0.14	2.94	0.25	2.58	-0.09	3.73	0.34	2.49	-0.64	3.73
11/04/2017	845	0.43	3.73	-0.75	5.85	0.14	3.20	-0.10	4.79	0.36	3.06	-0.29	4.79
12/04/2017	577	0.43	3.35	-0.85	5.06	0.24	2.71	-0.29	4.53	0.34	2.77	-0.46	4.27
15/04/2017	383	0.33	2.50	-0.04	3.50	0.29	2.62	-0.11	3.77	0.15	1.80	-0.21	3.50
16/04/2017	328	0.23	2.35	-0.4	2.44	0.27	2.25	-0.04	3.50	0.16	1.8	-0.5	2.97
18/04/2017	341	0.36	2.65	-0.45	2.40	0.14	2.13	0.13	2.94	0.25	2.16	-0.46	2.67
19/04/2017	384	0.22	2.53	-0.57	2.93	0.24	2.40	-0.10	2.93	0.25	2.17	-0.49	2.93
20/04/2017	528	0.42	3.01	-0.71	3.46	0.15	2.61	0.08	3.46	0.23	2.74	-0.34	3.72
17/04/2018	104	0.11	1.04	-0.11	1.69	0.10	1.02	-0.05	2.22	0.10	0.85	-0.06	2.33
18/04/2018	104	0.12	0.88	-0.07	1.48	0.12	0.88	-0.07	1.48	0.09	0.80	-0.15	2.28

TABLA II.

PARÁMETROS DERIVADOS DE LOS COEFICIENTES K_1 , K_2 Y K_3 DEL PERFIL DE VELOCIDADES LOG-WAKE: V_* (m/s) – VELOCIDAD DE CORTE, S (‰) PENDIENTE DE ENERGÍA, h_0 (mm) – DISTANCIA DEL FONDO A LA CUAL LA VELOCIDAD DEL PERFIL DE FLUJO SE HACE CERO, k_s (mm) – RUGOSIDAD ABSOLUTA DEL LECHO DE FONDO, Π (-) – PARÁMETRO DE ESTELA.

Fecha	Obtenidos a partir de K_1						Obtenidos a partir de K_2						Obtenidos a partir de K_3		
	V_* (m/s)			S (‰)			h_0 (mm)			k_s (mm)			Π (-)		
	V35	V50	V65	V35	V50	V65	V35	V50	V65	V35	V50	V65	V35	V50	V65
18/02/2017	0.12	0.18	0.09	0.8	1.3	0.3	5.288	4.159	3.063	158.6	124.8	91.9	-0.54	0.02	-0.71
23/02/2017	0.07	0.07	0.11	0.2	0.1	0.4	0.053	0.064	3.600	1.6	1.9	108.0	-0.23	0.24	-1.27
2/03/2017	0.13	0.14	0.08	0.5	0.5	0.2	0.534	1.969	0.136	16.0	59.1	4.1	-0.98	-0.46	-1.83
6/03/2017	0.09	0.08	0.11	0.2	0.1	0.3	0.015	0.004	0.241	0.4	0.1	7.2	0.54	-0.30	-1.23
7/03/2017	0.17	0.06	0.13	0.6	0.1	0.5	1.682	0.098	0.557	50.5	3.0	16.7	-0.69	-0.01	-0.56
8/03/2017	0.09	0.13	0.17	0.2	0.4	0.7	0.018	0.234	3.262	0.5	7.0	97.8	-0.32	-1.00	-1.42
13/03/2017	0.06	0.08	0.10	0.1	0.2	0.3	0.000	0.010	0.709	0.0	0.3	21.3	-0.28	-0.91	-1.24
15/03/2017	0.05	0.18	0.08	0.1	0.9	0.2	0.000	3.940	0.044	0.0	118.2	1.3	1.30	-0.75	-1.29
23/03/2017	0.10	0.10	0.06	0.3	0.3	0.1	0.047	0.078	0.047	1.4	2.3	1.4	-1.36	-0.52	-1.36
28/03/2017	0.06	0.13	0.13	0.1	0.4	0.5	0.000	0.486	0.445	0.0	14.6	13.4	0.12	0.19	-1.15
1/04/2017	0.14	0.06	0.11	0.5	0.1	0.3	0.632	0.000	1.370	19.0	0.0	41.1	-0.64	0.36	-1.48
2/04/2017	0.10	0.09	0.08	0.3	0.3	0.2	0.080	0.029	0.067	2.4	0.9	2.0	-0.41	-1.02	-1.33
3/04/2017	0.10	0.06	0.10	0.3	0.1	0.3	0.103	0.416	1.407	3.1	12.5	42.2	-0.46	-0.91	-1.07
4/04/2017	0.08	0.10	0.14	0.2	0.3	0.5	0.011	0.116	2.612	0.3	3.5	78.3	-0.33	-0.17	-0.93
11/04/2017	0.17	0.06	0.14	0.5	0.1	0.4	0.990	0.000	0.886	29.7	0.0	26.6	-0.87	-0.38	-0.40
12/04/2017	0.17	0.10	0.14	0.6	0.2	0.4	2.062	0.069	1.297	61.9	2.1	38.9	-0.99	-0.59	-0.67
15/04/2017	0.13	0.12	0.06	0.5	0.4	0.1	2.023	0.427	0.029	60.7	12.8	0.9	-0.06	-0.19	-0.69
16/04/2017	0.17	0.11	0.13	1.1	0.3	0.6	0.099	0.723	0.052	3.0	21.7	1.5	-0.85	-0.08	-1.43
18/04/2017	0.14	0.06	0.10	0.9	0.1	0.4	1.580	0.001	0.533	47.4	0.0	16.0	-0.62	0.47	-0.90
19/04/2017	0.09	0.10	0.10	0.3	0.3	0.4	0.025	0.133	0.501	0.8	4.0	15.0	-1.31	-0.21	-0.98
20/04/2017	0.17	0.06	0.09	0.8	0.1	0.2	2.708	0.000	0.029	81.2	0.0	0.9	-0.84	0.27	-0.73
17/04/2018	0.04	0.04	0.04	0.1	0.1	0.1	0.114	0.105	0.442	3.4	3.2	13.3	-0.50	-0.25	-0.28
18/04/2018	0.05	0.05	0.04	0.2	0.2	0.1	0.916	0.916	0.256	27.5	27.5	7.7	-0.30	-0.30	-0.85
Promedio	0.11	0.09	0.10	0.4	0.3	0.3	0.83	0.61	0.94	24.76	18.23	28.15	-0.46	-0.28	-1.04

Se observa que las pendientes medias de energía $S=V_*^2/(9.8Iy)$ varían entre 0.3 ‰ y 0.4 ‰ para las verticales analizadas; estos valores se aproximan a la pendiente hidráulica de 0.5 ‰ reportada para el tramo en estudio en la referencia [22]. Se constata que los valores medios de las rugosidades absolutas del lecho k_s , estimadas como $30h_0$ acorde a [23] varían entre 18.23 y 28.15 mm; estos valores guardan relación con las características gravosas del lecho en la zona de estudio [16]. Finalmente, se verifica que los valores medios del parámetro de estela varían entre -0.28 y -1.04; esto es consistente con las observaciones realizadas en canales con presencia de sedimentos en el lecho según [24] y [21].

B. Análisis de Perfiles Verticales de Concentración de Sedimentos

En la Fig. 4 se presentan los ajustes realizados con los perfiles de concentración medidos durante las avenidas del

04/04/17, 17/04/18 y 18/04/18 en las verticales de estudio V35, V50 y V65.

En la Fig. 5 presenta los ajustes realizados con los perfiles de concentración medidos durante otras avenidas ocurridas entre marzo y abril del 2017 donde solo se tomaron datos para la vertical V65.

En la Fig. 6 se comparan la totalidad de los resultados de concentración tomados en campo con los resultados de los cuatro modelos analizados.

Se observa que el modelo lineal-parabólico es el que tiene mejor correlación ($R^2=0.98$), ligeramente por encima de los modelos lineal ($R^2=0.97$) y Constante ($R^2=0.97$). La menor correlación del modelo parabólico ($R^2=0.81$) se debe a que asume en la superficie las concentraciones iguales a cero.

Perfiles de Concentración de Sedimentos: El Tigre

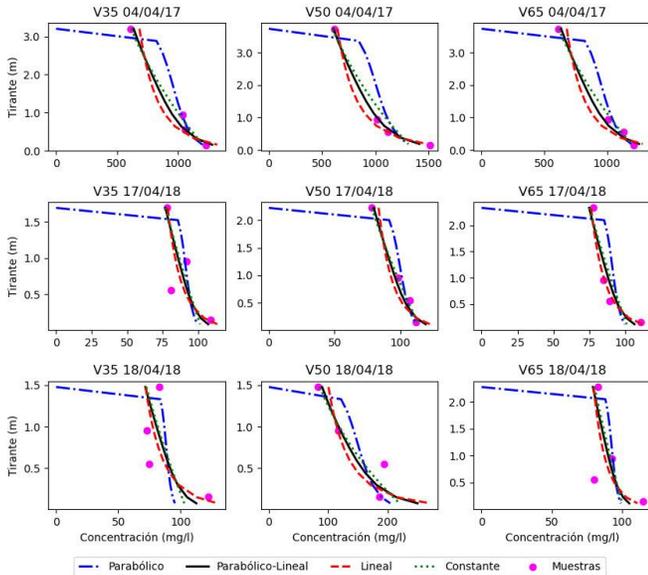


Fig. 4 Perfiles de Concentración de Sedimentos calculados en las verticales V35, V50 y V65 para las condiciones hidráulicas registradas en las fechas 04/04/2017, 17/04/2018 y 18/04/2018. También, se muestran las concentraciones muestreadas. En el año 2017 se tuvo la presencia de El Niño y el 2018 presencia de La Niña (débil).

Perfiles de Concentración de Sedimentos V65: El Tigre

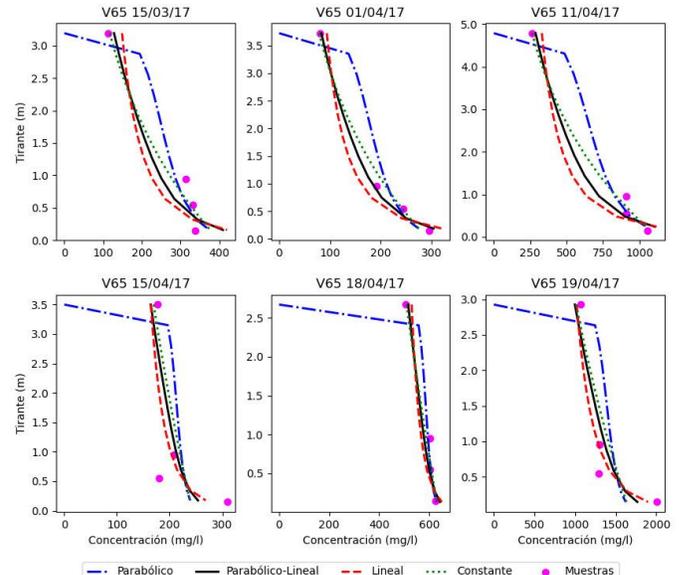


Fig. 5 Perfiles de Concentración de Sedimentos en Suspensión en la vertical V65 para diferentes fechas del año 2017, en presencia de El Niño.

C. Diámetros de material en suspensión y concentración de referencia

En la Tabla III se presentan los diámetros de material en suspensión (d_{50}) y las concentraciones de referencia (C_a) obtenidas como parámetros de ajuste de las metodologías empleadas para estimar los perfiles de concentración.

Se observa que los tamaños medios (d_{50}) del material sólido en suspensión estimados mediante el modelo lineal-parabólico varían entre 25 y 132 μm ; estos valores están en el orden de magnitud del rango de 8 y 70 μm mencionado en [22] y cercano al rango de d_{50} de 10.7 y 14.2 μm registrados por [25] en mediciones efectuadas el 08/04/21 (ver Fig. 7) donde el rango de tamaños observados varió entre d_{10} de 1.67 y d_{90} de 94.3 μm . En las mediciones de la referencia [25] se observó una distribución bimodal con picos alrededor de 14 μm y 100 μm .

Se constata también que los tamaños medios de los sedimentos suspendidos estimados para el Fenómeno El Niño de 2017 (de 62 a 132 μm) fueron de aproximadamente 2 veces los estimados para La Niña de 2018 (de 25 a 67 μm).

Asimismo, se observa que las concentraciones de referencia cercanas al fondo (ver TABLA III), obtenidas al ajustar los datos medidos de concentración a las distribuciones verticales de concentración teóricas varían entre 95mg/l y 1766 mg/l y que se incrementan a medida que los caudales líquidos se incrementan.

Se observa que las concentraciones de referencia a nivel de fondo estimadas para el Fenómeno El Niño de 2017 (de 254 a 1766 mg/l) fueron de aproximadamente 7 veces las estimadas para La Niña de 2018 (de 95 a 250 mg/l).

Finalmente, se constata que las mayores concentraciones de referencia cercanas al fondo y los mayores diámetros de material suspendido se presentan en la vertical V50, que es la ubicación donde se presentan las mayores velocidades y esfuerzos cortantes.

En la TABLA IV se presenta el detalle de los parámetros involucrados en el análisis de los perfiles de concentración de sedimentos en suspensión.

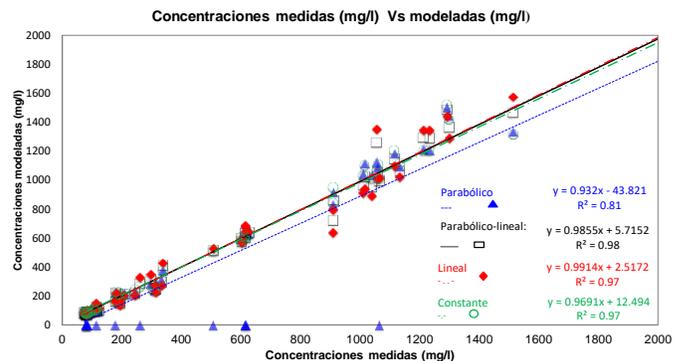


Fig. 6 Se muestra la correlación de las concentraciones medias medidas versus las modeladas mediante los cuatro modelos (parabólico, parabólico-lineal, lineal y constante). La correlación está dada por R^2 . Se determina que el mejor modelo es el parabólico-lineal con $R^2=0.98$.

SE MUESTRA LOS DIÁMETROS d_{50} (μm) Y CONCENTRACIONES DE REFERENCIA Ca (mg/l) PARA LOS PERFILES DE CONCENTRACIONES CALIBRADAS MEDIANTE LOS CUATRO MODELOS (PARABÓLICO, PARABÓLICO-LINEAL, LINEAL Y CONSTANTE).

TABLA III

Fecha	Caudal (m ³ /s)	Vertical	Parabólico		Parabólico Lineal		Lineal		Constante	
			d_{50}	Ca	d_{50}	Ca	d_{50}	Ca	d_{50}	Ca
			(μm)	(mg/l)						
15/03/2017	474	V65	40	375	54	409	38	420	50	376
1/04/2017	470		81	274	112	303	81	320	103	275
4/04/2017	423		67	1195	92	1256	66	1286	85	1196
11/04/2017	845		98	1047	132	1106	93	1118	125	1047
15/04/2017	383		32	239	49	254	39	268	41	238
18/04/2017	341		33	628	45	643	32	650	41	630
19/04/2017	384		48	1622	72	1766	56	1897	61	1631
17/04/2018	104		23	100	36	107	28	112	30	101
18/04/2018	104		16	99	25	105	20	111	20	100
4/04/2017	423		V50	62	1310	88	1310	64	1483	78
17/04/2018	104	27		113	39	119	28	123	35	114
18/04/2018	104	47		205	67	250	49	271	60	220
4/04/2017	423	V35	84	1203	62	1203	84	1324	107	1206
17/04/2018	104		24	100	27	100	28	114	31	101
18/04/2018	104		23	95	47	95	38	129	36	103

TABLA IV.

PARÁMETROS DE LOS PERFILES DE CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN LAS VERTICALES V35, V50 Y V65 DE LOS MODELOS EMPLEADOS (PARABÓLICO, PARABÓLICO-LINEAL, LINEAL, CONSTANTE). DÓNDE: $y(m)$ – TIRANTE, $V_s(m/s)$ – VELOCIDAD DE CORTE, $d_{50}(\mu\text{m})$ – DIÁMETRO MEDIO DE LOS SEDIMENTOS SUSPENDIDOS, $w_s(cm/s)$ – VELOCIDAD DE CAÍDA DE LOS SEDIMENTOS SUSPENDIDOS, $Ca(mg/l)$ – CONCENTRACIÓN DE REFERENCIA EN EL FONDO, $z(-)$ – EL EXPONENTE O NÚMERO DE ROUSE.

Modelo	Fecha	V35						V50						V65					
		y (m)	V_s (m/s)	d_{50} (μm)	w_s (cm/s)	Ca (mg/l)	z (-)	y (m)	V_s (m/s)	d_{50} (μm)	w_s (cm/s)	Ca (mg/l)	z (-)	y (m)	V_s (m/s)	d_{50} (μm)	w_s (cm/s)	Ca (mg/l)	z (-)
Parabólico	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.2	0.08	66.0	0.4	374.6	0.13	
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.7	0.11	80.7	0.6	274.3	0.14	
	3	3.2	0.08	52.3	0.2	1,203.0	0.07	3.7	0.10	61.9	0.3	1,309.9	0.09	3.7	0.14	66.8	0.4	1,194.7	0.07
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.8	0.14	97.8	0.9	1,047.5	0.15	
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	0.06	32.5	0.1	239.1	0.04	
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7	0.10	32.6	0.1	628.5	0.02	
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.9	0.10	48.0	0.2	1,622.1	0.05	
	8	1.7	0.04	23.7	0.1	99.7	0.03	2.2	0.04	27.4	0.1	112.8	0.04	2.3	0.04	23.3	0.0	99.9	0.03
	9	1.5	0.05	23.4	0.0	95.4	0.03	1.5	0.05	46.6	0.2	204.5	0.10	2.3	0.04	19.1	0.0	99.5	0.02
Parabólico-lineal	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.2	0.08	89.7	0.7	409.3	0.23	
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.7	0.11	112.1	1.1	303.5	0.26	
	3	3.2	0.08	72.7	0.5	1,282.2	0.14	3.7	0.10	87.5	0.7	1,411.9	0.17	3.7	0.14	92.2	0.8	1,256.2	0.14
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.8	0.14	132.3	1.6	1,105.9	0.27	
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	0.06	49.4	0.2	253.8	0.09	
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7	0.10	45.1	0.2	643.2	0.04	
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.9	0.10	72.2	0.5	1,765.6	0.12	
	8	1.7	0.04	35.9	0.1	107.1	0.07	2.2	0.04	38.7	0.1	119.2	0.08	2.3	0.04	35.6	0.1	106.6	0.07

Modelo	Fecha	V35						V50						V65					
		y (m)	V* (m/s)	d ₅₀ (μm)	w _s (cm/s)	Ca (mg/l)	z (-)	y (m)	V* (m/s)	d ₅₀ (μm)	w _s (cm/s)	Ca (mg/l)	z (-)	y (m)	V* (m/s)	d ₅₀ (μm)	w _s (cm/s)	Ca (mg/l)	z (-)
	9	1.5	0.05	44.4	0.2	112.7	0.09	1.5	0.05	66.8	0.4	250.4	0.21	2.3	0.04	30.1	0.1	105.3	0.06
Lineal	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.2	0.08	62.9	0.4	420.1	0.12
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.7	0.11	80.9	0.6	319.9	0.14
	3	3.2	0.08	52.3	0.2	1,324.1	0.07	3.7	0.10	64.4	0.4	1,482.6	0.09	3.7	0.14	66.1	0.4	1,285.8	0.07
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.8	0.14	93.3	0.8	1,118.1	0.14
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	0.06	38.8	0.1	268.5	0.05
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7	0.10	32.2	0.1	649.8	0.02
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.9	0.10	55.8	0.3	1,897.4	0.07
	8	1.7	0.04	28.2	0.1	113.5	0.04	2.2	0.04	28.1	0.1	122.6	0.04	2.3	0.04	27.7	0.1	112.4	0.04
	9	1.5	0.05	37.6	0.1	129.5	0.07	1.5	0.05	48.8	0.2	271.5	0.11	2.3	0.04	24.1	0.1	111.2	0.04
Constante	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.2	0.08	83.9	0.6	376.2	0.20
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.7	0.11	102.7	0.9	274.6	0.22
	3	3.2	0.08	66.5	0.4	1,205.8	0.12	3.7	0.10	78.5	0.5	1,308.6	0.14	3.7	0.14	85.1	0.6	1,195.7	0.12
	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.8	0.14	124.8	1.4	1,047.3	0.24
	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	0.06	40.6	0.1	238.4	0.06
	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.7	0.10	41.2	0.2	629.8	0.04
	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.9	0.10	61.4	0.3	1,631.3	0.08
	8	1.7	0.04	30.5	0.1	101.4	0.05	2.2	0.04	35.0	0.1	114.0	0.07	2.3	0.04	30.5	0.1	101.2	0.05
	9	1.5	0.05	36.4	0.1	103.0	0.06	1.5	0.05	59.7	0.3	220.2	0.17	2.3	0.04	24.7	0.1	100.2	0.04

Nota: 1=15/03/2017 2=01/04/2017 3=04/04/2017 4=11/04/2017 5=15/04/2017 6=18/04/2017 7=19/04/2017 8=17/04/2018

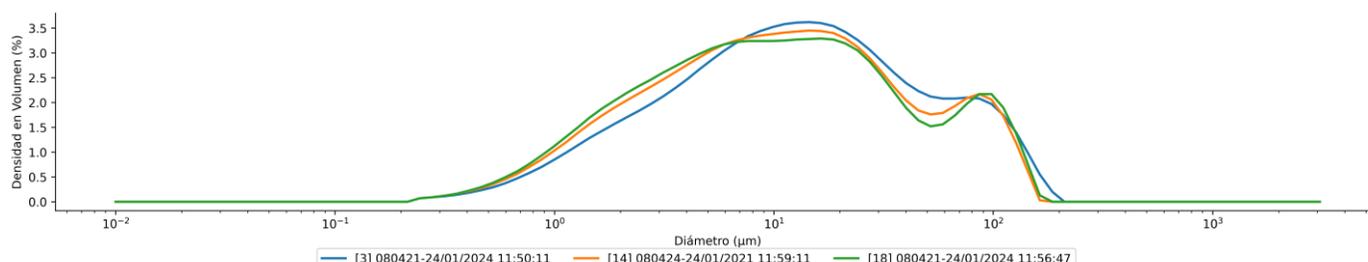


Fig. 7 Curva granulométrica de los sedimentos suspendidos en el flujo del río Tumbes (estación El Tigre) muestreada el 8 de abril de 2021 (tres mediciones). Se aprecia dos picos, uno alrededor de 14μm y otro alrededor de 100 μm.

IV. CONCLUSIONES

La distribución vertical teórica de velocidades de flujo log-wake se ajusta adecuadamente al conjunto de datos medidos en la estación El Tigre sobre el río Tumbes para eventos extremos. Las pendientes medias de 0.3 ‰ a 0.4 ‰ resultantes de dicho ajuste corresponden a la pendiente de un río de planicie. Los valores estimados de las rugosidades absolutas (de 18.23 a 28.15 mm) y de los parámetros de estela (de 0.28 a -1.04) corresponden a los de un río con lecho de grava.

La distribución vertical teórica de concentraciones que ajusta mejor es la resultante de la distribución “parabólico-lineal” del coeficiente de mezcla del fluido ($R^2=0.98$). Los

tamaños medios de material en suspensión estimados varían entre 25 y 132 μm (limo y arena fina). Las concentraciones de referencia cercanas al fondo estimadas varían entre 95 mg/l y 1766 mg/l.

Los tamaños medios de los sedimentos suspendidos estimados para el Fenómeno El Niño de 2017 (de 62 a 132 μm) son de aproximadamente 2 veces los estimados para La Niña de 2018 (de 25 a 67 μm). Las concentraciones de referencia a nivel de fondo estimadas para el Fenómeno El Niño de 2017 (de 254 a 1766 mg/l) son de aproximadamente 7 veces las estimadas para La Niña de 2018 (de 95 a 250 mg/l).

V. DISCUSIONES

La facilidad de utilizar un modelo de concentración es que no requiere realizar varias medidas a lo largo del perfil, sin embargo, es necesario contar con el Ca, que es la muestra cercana al fondo para poder calibrarlo, a pesar de tener que muestrear el Ca se ahorra tiempo y esfuerzo al no tener que muestrear todo el perfil.

Se debe considerar una muestra de sedimentos que tiene una incertidumbre que está asociada a la forma de muestreo en campo, la manipulación en laboratorio y esta según [15], puede llegar a ser de 30 a 40%, conscientes de estos valores los modelos cumplen un papel importante en disminuir el tiempo en campo, menor número de muestras y menor exposición a las personas en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al FONDECYT por financiar la presente investigación a través del IGP. A S.M.J. y E.A.C. de IGP por proponer el tema de la investigación y proporcionar valiosa guía y colaboración para desarrollarla. A R.C.T. de la UNI por su valiosa guía y colaboración para el desarrollo de la investigación. Al PEBPT y al SENAMHI por su apoyo en la toma de datos y a la UNIFIC-IIFIC por financiar la publicación del presente artículo.

REFERENCIAS

- [1] L. Van Rijn, "Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas," 1993.
- [2] S. Morera, T. Condom, A. Crave, P. Steer, and J. L. J. S. R. Guyot, "The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012)," vol. 7, no. 1, p. 11947, 2017.
- [3] G. Philander, "El Niño, La Niña, and the southern oscillation," *International geophysics series*, vol. 46, pp. X-289, 1989.
- [4] R. Campaña, "Estudio sedimentológico de la cuenca Catamayo-Chira con fines de aprovechamiento," Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería Civil-UNI, 1996.
- [5] A. Rocha, *Introducción a la hidráulica fluvial*. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil, 1998.
- [6] I. Nezu, A. Tominaga, and H. J. J. o. H. E. Nakagawa, "Field measurements of secondary currents in straight rivers," vol. 119, no. 5, pp. 598-614, 1993.
- [7] K. Ghoshal and S. Kundu, "Influence of secondary current on vertical concentration distribution in an open channel flow," *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 88-96, 2013.
- [8] T. Moramarco, C. Saltalippi, and V. P. J. J. o. H. E. Singh, "Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiu's velocity distribution equation," vol. 9, no. 1, pp. 42-50, 2004.
- [9] R. Mendoza, "Modelado de perfiles de concentración de sedimentos en ríos de montaña tropical," Ingeniero Civil, Hidráulica, Universidad Nacional de Ingeniería, 2019.
- [10] H. Rouse, "Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence," *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 102, no. 1, pp. 463-505, 1937.
- [11] M. O'Brien, "Review of the theory of turbulent flow and its relation to sediment-transportation," *Transactions American Geophysical Union*, vol. 14, no. 1, pp. 487-491, 1933.
- [12] N. Coleman, "Flume studies of the sediment transfer coefficient," *Water Resources Research*, vol. 6, no. 3, pp. 801-809, 1970.
- [13] L. Van Rijn, "Sediment transport, part II: suspended load transport," *Journal of hydraulic engineering*, vol. 110, no. 11, pp. 1613-1641, 1984.
- [14] A. Higgins, J. C. Restrepo, L. J. Otero, J. C. Ortiz, and M. Conde, "Distribución vertical de sedimentos en suspensión en la zona de desembocadura del Río Magdalena, Colombia," *Latin american journal of aquatic research*, vol. 45, no. 4, pp. 724-736, 2017.
- [15] E. Armijos *et al.*, "Measuring and modeling vertical gradients in suspended sediments in the Solimões/Amazon River," *Hydrological processes*, vol. 31, no. 3, pp. 654-667, 2017.
- [16] B. Quincho, "Estudio experimental del transporte de sedimentos en suspensión y fondo y comparación con fórmulas empíricas en los ríos Puyango-Tumbes y Zarumilla," 2015.
- [17] A. Goyburo, "Monitoreo y caracterización del transporte de sedimentos durante crecidas o eventos extremos de El Niño en el río Tumbes," 2017.
- [18] P. Fuentes, T. Alfaro Abanto, I. Martínez Carrillo, L. K. Cieza De Los Santos, O. D. Vargas Cerón, and J. S. Quiñones Rojas, "Tratamiento de cauce del río Tumbes para el control de inundación y erosión fluvial," 2014.
- [19] ANA, "Estudio hidrológico de la cuenca del río Puyango-Tumbes," 2014.
- [20] ANA. (2019). *Río Tumbes*. Available: <https://www.ana.gob.pe/2019>
- [21] D. Subhasish, "Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena-GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences," *New Delhi, India*, pp. 158-162, 2014.
- [22] INADE and PEBPT, "Dragado del río Tumbes y limpieza de los cauces naturales de alivio," 1992.
- [23] J. Nikuradse, "Stromungsgesetze in rauhen Rohren," *VDI-Forschungsheft*, vol. 361, p. 1, 1933.
- [24] P. Hanmaiahgari, V. Roussinova, and R. Balachandar, "Turbulence characteristics of flow in an open channel with temporally varying mobile bedforms," *Journal of Hydrology Hydromechanics*, vol. 65, no. 1, pp. 35-48, 2017.
- [25] IGP, "Mediciones efectuadas durante el año 2021," ed. No publicado, 2021.