



Simulación Matemática del Transporte de Sedimentos en el Río Chambo

Mathematical Simulation of Sediment Transport in the Chambo River

Simulação Matemática do Transporte de Sedimentos no Rio Chambo

Henry Mauricio Villa Yáñez ^I

hvilla@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-4076-5211>

Correspondencia: hvilla@unach.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 02 de febrero de 2024 * **Aceptado:** 17 de febrero de 2024 * **Publicado:** 03 de marzo de 2024

- I. Máster Universitario en Ingeniería Matemática y Computación. Magíster en Seguridad Telemática. Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo en la Facultad de Ciencias Políticas y Administrativas. Riobamba-Ecuador.

Resumen

El análisis de concentración de material sólido se puede realizar utilizando datos reales y modelos numéricos, sin embargo, estos estudios son escasos en la subcuenca del río Chambo. Por ello se puntualiza necesario desarrollar un modelo de transporte de partículas materiales, siendo un aporte para investigaciones posteriores, que pretendan estimar la formación de fenómenos de sedimentación y socavación que dañan al ecosistema y producción de la subcuenca. De acuerdo con lo expuesto se desarrolló un algoritmo de simulación de un modelo numérico en el software Matlab que representa el transporte de concentración de partículas materiales. Así pues, se consideró necesario simular el afluente máximo de crecida en ANSYS FLUID FLOW, esto permitió conocer el régimen de turbulencia caracterizando que a lo largo del trayecto el régimen de turbulencia permanece estacionario. Mediante método de Diferencias Finitas Retardadas y el método Explícito de Euler se elabora el modelo de transporte numérico en MATLAB para las matrices de diferenciación. Es así como se simulan los términos advectivo y temporal aplicando el modelo de transporte numérico. Se utilizaron datos constantes para la pendiente longitudinal (23,95%) y velocidad (16,16 m/s) de flujo de la subcuenca. Los resultados obtenidos mostraron una incertidumbre aceptable y se corroboró la factibilidad del modelo de simulación de partículas materiales en el trayecto del afluente.

Palabras Clave: Flujo; Modelos numéricos; Simulación computacional; Subcuenca; Transporte de concentración de sedimentos.

Abstract

The analysis of solid material concentration can be carried out using real data and numerical models, however, these studies are scarce in the Chambo River sub-basin. For this reason, it is necessary to develop a transport model of material particles, being a contribution for subsequent research, which aims to estimate the formation of sedimentation and scour phenomena that damage the ecosystem and production of the subbasin. In accordance with the above, a simulation algorithm of a numerical model was developed in the Matlab software that represents the concentration transport of material particles. Therefore, it was considered necessary to simulate the maximum flood tributary in ANSYS FLUID FLOW, this allowed us to know the turbulence regime, characterizing that along the path the turbulence regime remains stationary. Using the Delayed Finite Difference method and Euler's Explicit method, the numerical transport model is developed

in MATLAB for the differentiation matrices. This is how the advective and temporal terms are simulated by applying the numerical transport model. Constant data were used for the longitudinal slope (23.95%) and velocity (16.16 m/s) of flow of the subbasin. The results obtained showed an acceptable uncertainty and the feasibility of the simulation model of material particles in the tributary path was corroborated.

Keywords: Flow; Numerical models; Computer simulation; Subbasin; Sediment concentration transport.

Resumo

A análise da concentração de materiais sólidos pode ser realizada utilizando dados reais e modelos numéricos, no entanto, estes estudos são escassos na sub-bacia do rio Chambo. Por esse motivo, faz-se necessário o desenvolvimento de um modelo de transporte de partículas materiais, sendo uma contribuição para pesquisas posteriores, que visam estimar a formação de fenômenos de sedimentação e erosão que prejudicam o ecossistema e a produção da sub-bacia. De acordo com o exposto, foi desenvolvido um algoritmo de simulação de um modelo numérico no software Matlab que representa o transporte de concentração de partículas de material. Portanto, considerou-se necessário simular o tributário de cheia máxima no ANSYS FLUID FLOW, isso permitiu conhecer o regime de turbulência, caracterizando que ao longo do caminho o regime de turbulência permanece estacionário. Utilizando o método de Diferenças Finitas Atrasadas e o método Explícito de Euler, o modelo numérico de transporte é desenvolvido em MATLAB para as matrizes de diferenciação. É assim que os termos advectivos e temporais são simulados através da aplicação do modelo numérico de transporte. Foram utilizados dados constantes para declividade longitudinal (23,95%) e velocidade (16,16 m/s) de vazão da sub-bacia. Os resultados obtidos apresentaram uma incerteza aceitável e foi corroborada a viabilidade do modelo de simulação de partículas de material no caminho tributário.

Palavras-chave: Fluxo; Modelos numéricos; Simulação de computador; Sub-bacia; Transporte de concentração de sedimentos.

Introducción

Los sedimentos son partículas sólidas y pueden ser clasificados como limo, arcilla, arena y entre otras, es decir, todo material que se desprende en zonas aledañas y son depositadas en el fondo del

caudal (García & Maza, Manual de Ingeniería de Ríos, 1996). Según sus resultados Aksoy et al. (2019) mencionan que las erosiones y el proceso de transporte de sedimentos en los ríos está relacionado con el cambio climático y antropogénico; en muchas zonas, la intensidad de las precipitaciones actúa de manera directa en la erosión pluvial. Además, causas como la agricultura originan deterioros y esto es el inicio del proceso del transporte de sedimentos en el caudal, provocando pérdida de altura e incluso inundaciones, también uno de los factores que a veces no se considera es la demografía que acelera el cambio en la cobertura del suelo, por tanto, es necesario contar con datos reales y de laboratorio que ayude a la toma de decisiones sobre la capacidad de cuidado del afluente. El estudio de caudales es de suma importancia para el cuidado del ambiente que está a su alrededor, del mismo modo, el análisis de modelos de transporte de sedimentos permite caracterizar el ecosistema de un río y entender los diferentes fenómenos que actúan en el proceso, esto se complementa al momento de elaborar un modelo de simulación ya sea en 2D (Basri et al., (2020 p. 4). La investigación de Abad, (2008) mostró la dificultad que existe al momento de realizar el modelamiento físico o numérico en ríos, y presentaron el análisis de un modelo hidrodinámico, para transporte de sedimentos y de morfología del lecho promediado en profundidad en 2D a la cual le denominaron STREMR HySeD.

Lepesqueur et al. (2018) indican que la mayoría de modelos no toman en cuenta las propiedades de los sedimentos en suspensión como la densidad y la distribución del lugar de las partículas, enfocados en lo anterior desarrollaron un modelo hidromorfodinámico con acoplamiento TELEMAC-3D (v7p1) y SISYPHE (v7p1) ambas proporcionadas por TELEMAC-MASCARET. Esto permitió mejorar la parametrización de los sedimentos, evaluando el parámetro agregado ejecutaron la simulación de un evento de inundación del río Orne ubicado en Francia obteniendo resultados favorables al agregar y mejorar el modelo de sedimentos basado en una distribución granulométrica de sedimentos y densidad de sedimentos distribuida. Usando la misma metodología Cusipuma et al. (2018) aplicando el modelo hidrodinámico (Telemac-2D) simularon un tramo curvo del río madre de Dios, donde recalcan que subestima las velocidades en un 36%, aplicando una corrección de flujo minimizan estos valores. La aplicación de un modelo hidrodinámico completo realizado por Torres et al. (2022), mostró resultados aceptables, sin embargo, señalan que aún se puede incluir más parámetros que permita aumentar la sensibilidad del modelo, también proponen realizar estudios en diferentes épocas climáticas.

Hajigholizadeh et al. (2018) aclaran que el proceso de erosión y el transporte de sedimentos es causado por el proceso de la precipitación y escurrimiento lo que genera la transferencia de materiales a lo largo del río. De acuerdo a ello elaboran una revisión bibliográfica de los diversos modelos de transferencia desarrollados por otros investigadores determinando que se puede caracterizar por modelos empíricos, conceptuales, físicos e híbridos. Los resultados indicaron que el Programa de Simulación Hidrológica, Fortran (HSPF), adopta un modelo conceptual de acceso libre y aborda problemas de carga máxima diaria total de sedimentos y nutrientes, además calcula la socavación o deposición de sedimentos cohesivos bajo el esfuerzo cortante del lecho. El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) considerado como continuo y de uso regional la cual opera en un paso de tiempo y es utilizado para predecir aguas superficiales y subterráneas. Así mismo los modelos híbridos como THORNES, IHACRES-WQ, SEDNET y Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) juegan un papel importante ya que pueden utilizarse para pronosticar vulnerabilidades de erosión hídrica y reducción de productividad en laderas. De acuerdo a estos hallazgos consideraron que el modelo adecuado depende mucho del objetivo y de las preguntas de investigación y también mencionan que se debe considerar la validación del modelo, escalas espaciales, temporales, entre otros.

Godoy et al. (2020) analizan diferentes puntos de muestreo de sedimentos a lo largo del río Chibunga, con el fin de enfocar la sostenibilidad del tratamiento de estos sedimentos. Sus resultados mostraron una sostenibilidad baja, luego para las muestras 5 y 6 se obtuvo un valor del índice de sostenibilidad de cuencas $WSI < 0.5$, la sostenibilidad media se obtuvo para los puntos 1 al 4 con valores de WSI entre 0.5 a 0.8. Del análisis elaborado se optó por realizar el tratamiento de sedimentos en los puntos 5 y 6 mediante tecnologías de biorremediación. Por otra parte, el trabajo desarrollado por Arias y Pérez (2018) tuvo el fin de realizar un estudio hidráulico del río Chambo donde sus resultados mostraron que el río alcanza una profundidad máxima de 2,6 m en época seca y 5,3 m en época lluviosa, esto se llevó a cabo con el fin de determinar zonas de inundación mediante el método HEC-RAS, identificándose los meses de mayo y junio con mayores sucesos de precipitación.

En la actualidad los estudios del transporte de partículas materiales a lo largo del río Chambo son escasos, por lo que se planteó elaborar un modelo que represente de manera óptima el transporte de sedimentos bajo ciertas condiciones. Por tal motivo, en la investigación se presentaron las características fluviales del río manteniendo los parámetros de la pendiente longitudinal (23,95%)

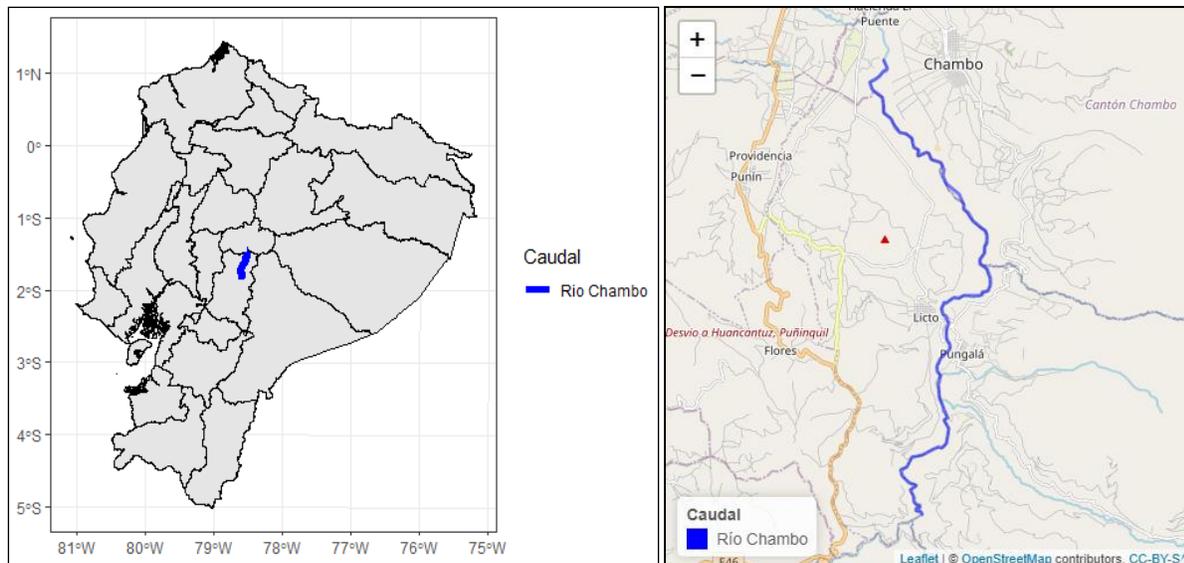
y velocidad (16,16 m/s) constantes a lo largo del trayecto. Las especificaciones y parámetros constantes del modelo determinan futuras investigaciones que analicen la altura de la cuenca y la variabilidad de la velocidad en curvas. Esto será posible mediante el uso de tecnologías que permitan simular estos fenómenos en 3D utilizando programas como HYDRO-BID, FLUID FLOW, entre otros donde se pueda observar de manera gráfica el comportamiento de los caudales. Por lo cual la investigación se basó en desarrollar y modelar el fenómeno de transporte de partículas materiales sólidas mediante el Método de Diferencias Finitas. Como primer paso, usando el software ANSYS, se caracterizó el tipo y sistema de flujo, lo que ayudó a predecir valores semejantes y óptimos del volumen y concentración de transporte. El desarrollo del algoritmo de simulación se realizó en Matlab R2013 desarrollado por Cleve Moler en México, se consideró los parámetros de profundidad y longitud uniforme, conformado por dos componentes: difusión y advección, sin embargo, en este estudio se pretende modelar solo con el parámetro de advección y se estableció un valor del término de Courant-Friedrichs-Lewy, como una condición de convergencia para las ecuaciones diferenciales. En el sentido académico el estudio puede ser pionero para nuevas investigaciones con el fin de optimizar el modelo de simulación a la realidad del caudal, tomando en cuenta más especificaciones como añadir el término difusivo, variable que no se consideró al momento de plantear el modelo.

Metodología

Ubicación

La investigación toma como área de estudio la subcuenca del río Chambo (figura 1), la cual pertenece a la vertiente Atlántica en la cordillera de los Andes en cuenca alta del río Pastaza ubicado en el centro del Ecuador Continental con una longitud total de 273 km y un área de 3571 km² (Arias & Pérez, 2018). Donde se realiza la recolección de datos como velocidad, caudal y barimetría en diferentes puntos estratégicos.

Figura 1. Ubicación geográfica del Río Chambo



Fuente. Elaboración propia

Simulación del Flujo de Fluidos

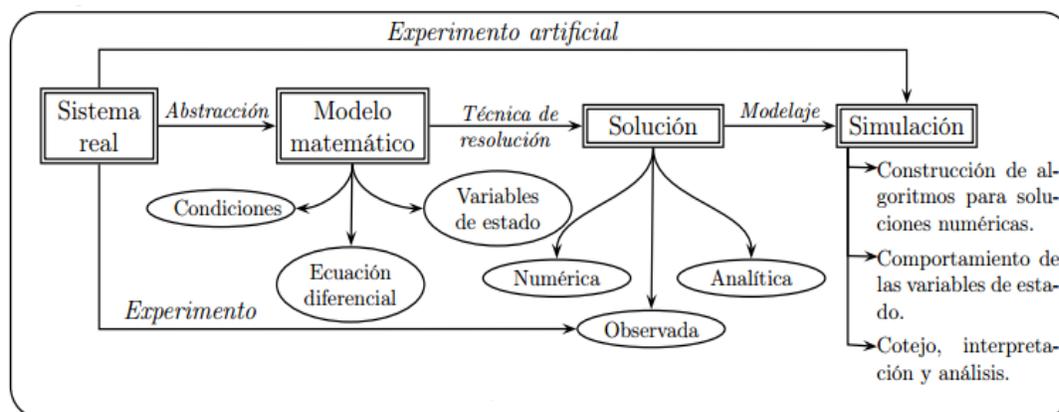
Se tomó la dirección horizontal para el flujo de masa incompresible y permanente de sedimentos en un área determinada, de modo que, el flujo de masa de sedimento se considere continuo. De acuerdo con esta condición la investigación se desarrolló bajo términos macroscópicos, ya que si se considera un estudio microscópico las ecuaciones no presentan resultados posibles. Actualmente existe carencia de información de la variabilidad de sedimentos en la subcuenca, por lo que se consideró emplear datos tomados del trabajo de Arias y Pérez (2018), extrayendo la velocidad y el promedio de caudales, importantes para el desarrollo del modelo matemático.

La capa de fondo se considera a la carga y transporte de sedimentos, esto para suprimir la alta velocidad del flujo lo cual puede provocar cambios en la viscosidad. De acuerdo con la naturaleza del movimiento los sedimentos y el volumen de agua se incluyó leyes de dispersión y difusión en el modelo, de todo eso se asume el transporte según el patrón advectivo y difusivo. Considerando un flujo turbulento estable y uniforme, se modeló aplicando ecuaciones de energía, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning, con un factor de fricción constante utilizando el programa ANSYS R19.2 -FLUID FLOW desarrollado por ANSYS y Flite Software NI Ltd respectivamente, que usa el método de volúmenes finitos para modelar el flujo aproximado de la subcuenca.

Muchos de los problemas pueden ser modelados aplicando ecuaciones diferenciales ya sean ordinarias o parciales ya que su deducción no es tan difícil, sin embargo, las soluciones por métodos exactos se obtienen para casos muy particulares. Por lo que en la práctica no se logran obtener

dichas soluciones analíticas, entonces para poder mitigar este inconveniente se recurre a los métodos numéricos con el fin de obtener interpretaciones del diseño y análisis con un grado de aproximación aceptable al problema en estudio. Todo lo mencionado se puede apreciar en la Figura 2.

Figura 2. Representación general del proceso de abordaje de los problemas



Fuente. Elaboración propia

Tabla 1. Características de la subcuenca del río Chambo

Criterio	Valor	Detalle
Factor de Forma	0.69	Crecida con fuertes lluvias
Pendiente media de la cuenca	23.95%	Indica lo accidentado de la cuenca
Elongación de la cuenca	0,94	Relieve pronunciado
Velocidad	16,16 m /s	Constante a lo largo del trayecto
Radio hidráulico	0,75	constante
Profundidad	2,60m	constante

Fuente. Elaboración propia

Construcción del Modelo Analítico

El modelo analítico fue elaborado de acuerdo a los lineamientos relacionados con el flujo, así mismo, tomando en cuenta los resultados obtenidos en la simulación de flujos. Posteriormente se

analizó el transporte de partículas y se limitaron las condiciones para la construcción del modelo, esto fue necesario para disminuir la complejidad y el coste computacional.

Bajo los criterios de fenómenos de difusión y advección se plantea la ecuación (1):

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \quad (1)$$

Donde D representa al término difusivo, y \bar{u} la velocidad de caudal definida a partir de los datos del afluente histórico de la subcuenca; \bar{C} representa la concentración promedio (tabla 4) de partículas para ríos (Arias & Pérez, 2018). Sin embargo, el modelo de simulación no tomó en cuenta el término difusivo.

La velocidad del flujo se calculó empleando la ecuación 2, con C como el coeficiente de Chezy equivalente a $C = \frac{C_1}{n_p} R^{1/6}$, utilizando del valor de paredes ásperas $n_p = 0,025$ y $C_1 = 1$ fue extraído del sistema internacional, con radio hidráulico de $R = 0.75$ y S es la pendiente longitudinal.

$$V = C\sqrt{RS} \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{0,025} 0,75^{1/6} \sqrt{0,75 * 0,2395} = 16,16m/s$$

Se ha tomado en cuenta una sola dimensión en atención a los criterios de complejidad y el coste computacional ya que, para la ejecución de este tipo de simulaciones en 2 o más dimensiones se requiere de otro tipo de software, así también recursos computacionales adicionales para poder realizar una operación adecuada de los resultados gráficos que se desearía obtener dentro de la simulación, resultados que al no tener los elementos necesarios fueran completamente erróneos.

Modelado Numérico y Algoritmo de Resolución

Para la solución numérica fue necesario el uso de la CFD (Computational Fluid Dynamics). El modelado se desarrolla a partir de la ecuación (2), además no se considera la incorporación del término difusivo, según el resultado obtenido de la simulación en ANSYS. Se definieron condiciones de frontera e iniciales, dadas por las ecuaciones (3) y (4) (Haberman, 2003).

$$C_f: C_i: \bar{C}(x = 0, t) = \bar{C}_0 = \bar{C}_I(1) \approx 0.275 (27.5 \%) \text{ con } 0 \leq x < L, \quad (3)$$

Donde L es la longitud media de la subcuenca, mientras que C_f y C_i son la condición final e inicial.

$$C_i: \bar{C}(x, 0) = \bar{C}_I(x) \approx 0.275 \sin(4\pi x) \quad (4)$$

Hamming (1987) realiza la transformación de la ecuación (1) y las condiciones de contorno bajo un sistema de ecuaciones algebraicas discretas para el tiempo y las variables espaciales. Bajo el esquema de “Euler explícito” se desarrolla el cambio de las variables continuas a la forma discreta temporal, obteniendo la ecuación (5):

$$\bar{C}^{n+1} = \bar{C}^n - \Delta t \bar{u} \frac{\partial \bar{C}^n}{\partial x} \quad (5)$$

Con Δt que representa la variación del tiempo, C es la concentración, \bar{u} es el parámetro de la velocidad y n el número de puntos interiores en el dominio. Hirsch (2007) analiza $\bar{u} > 0$, usando la derivada espacial mediante diferencias finitas atrasadas de primer orden de la advección para la condición inicial \bar{C}_I , dando como resultado la ecuación (6):

$$\frac{\partial \bar{C}_i}{\partial x} \approx \frac{\bar{C}_i - \bar{C}_{i-1}}{\Delta x} \quad (6)$$

Disponiendo de la ecuación (5) y (6) da como resultado la ecuación (7):

$$\bar{C}^{n+1} = \bar{C}_i^n - \Delta t \bar{u} \frac{\bar{C}_i^n - \bar{C}_{i-1}^n}{\Delta x}, i = 1, \dots, N, \bar{C}_0^n = \bar{C}_0 \quad (7)$$

Donde N representa el número de pasos temporales.

Muestra

Para este estudio se tomó los datos publicados por el Consejo Nacional de Recursos Hídricos (2007), de este modo se tuvo promedios de caudales históricos (tabla 2), para ello se utilizó el aporte de cada microcuenca, excluyendo los valores de drenajes. Además, es importante señalar que estos valores no representan rendimientos naturales, pues estas son afectadas por canales de riego que existen aguas arriba y no se puede rehacer un régimen natural. Como se pudo apreciar cada una de las microcuencas y drenajes aportan una proporción de partículas materiales, donde se estimó una media total de 6.43%, la microcuenca que más aporta es Blanco (2,51%) seguido por Guilles (1.53%). Quienes tienen un aporte de más del 1%, mientras que las demás están por debajo de este porcentaje (Tabla 2).

Tabla 2. Caudal (Q) de las microcuencas y drenajes del río Chambo (m³/s), 1963-2005

Microcuenca	T1	T2	T3	T4	Anual	S%	$\bar{C}(\%) \approx$
Ozogoche	9,579	10,406	4,128	7,479	7,898	3.1	0.63
Guamote	2,927	4,326	1,041	2,254	2,640	2	0.25

Alao	5,053	7,088	4,350	4,300	5,200	2.2	0.29
Puela	10,908	17,068	14,226	10,186	13,100	2.9	0.50
Blanco	1,644	2,440	1,418	1,677	1,790	6.8	2.51
Chibunga	15,869	21,371	14,669	14,666	16,640	3.2	0.60
Guilles	6,470	8,544	6,052	6,064	5,780	5.3	1.53
Yasipan	4,769	5,156	2,056	3,691	3,920	1.3	0.11
Drenaje 1	1,437	1,966	1,012	1,459	1,470	0.9	0.05
Drenaje 2	8,096	11,027	7,456	7,631	8,550	0.9	0.05

Fuente. Elaboración propia

Analizando la capacidad de transporte Tabla (3), se observó un alto aporte de las microcuencas Chibunga, seguido por Guilles y en tercer lugar la de Puela, A pesar de la contribución de los demás ríos, estas son las más elevadas, asimismo se pudo apreciar que los drenajes no muestran ayuda significativa en la capacidad de transporte de caudal sólido en el Río Chambo.

Tabla 3. Capacidad de transporte (Q_s) de partículas materiales de río Chambo, 1963-2005

Microcuenca	T1	T2	T3	T4	Anual
Ozogoche	5,173	5,619	2,229	4,039	4,265
Guamote	0,732	1,082	0,260	0,564	0,660
Alao	1,465	2,056	1,2615	1,247	1,508
Puela	5,454	8,534	7,113	5,093	6,55
Blanco	4,126	6,124	3,559	4,209	4,493
Chibunga	9,521	12,823	8,801	8,799	9,984
Guilleas	9,899	13,072	9,259	9,277	8,843
Yasipan	0,525	0,567	2,056	0,226	0,431
Drenaje 1	0,072	0,098	0,051	0,073	0,074
Drenaje 2	0,405	0,551	0,373	0,382	0,4275

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla (4) se incluyeron los parámetros iniciales que fueron utilizados en el modelo de simulación, los pasos temporales, longitud de la subcuenca y entre otras. El factor de escala se

utiliza para minimizar el avance según el tiempo, por lo que el valor de 273000 m será igual a la unidad.

Tabla 4. Parámetros asociados para el modelo de simulación del río Chambo

Parámetros	Valor
Puntos interiores del dominio (n_x)	100
Pasos temporales (N_t)	300
Pendiente longitudinal promedio (\bar{S})	23.95 %
Superficie de la subcuenca (A)	3580 km ²
Término de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)	0.5
Longitud de la subcuenca (longitud del dominio) (L_x)	273000 m = 1 (<i>factor de escala</i>)
Condición inicial (\bar{C})	0.275

Fuente. Elaboración propia

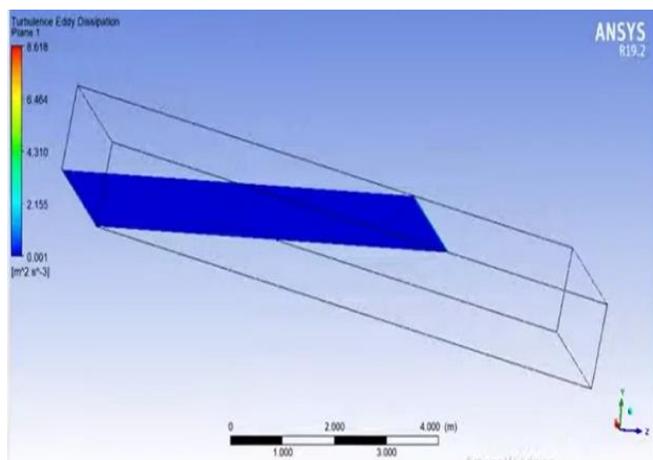
Para la solución numérica fue necesario el uso de la CFD (Computacional Fluid Dynamics), para ello se dividió en tres etapas o procesos, lo que permitió separar la parte temporal de la espacial, formando sistema de ecuaciones discretas y fue fundamental aplicar el método de diferencias finitas. Además, se hizo uso de la condición de Dirichlet definiendo un campo vectorial y especificando los valores de las variables, Neuman que especifica el valor de las derivadas en dirección a la frontera y Mixta para las diversas condiciones de márgenes del dominio

Resultados y Discusión

El primer paso fue determinar el tipo de flujo del afluente a lo largo del río Chambo, para ello se analizó el Factor de Eddy Compositon (Figura 2). Dicho valor mide o cuantifica la intensidad turbulenta que existe dentro de la subcuenca (Childress et al., 2012), esta se mantiene en color azul a lo largo del recorrido, además asumimos un caudal líquido con viscosidad y densidad constante, coeficiente de difusión en un régimen estacionario, por tanto, no existe variaciones bruscas en los estados difusivos.

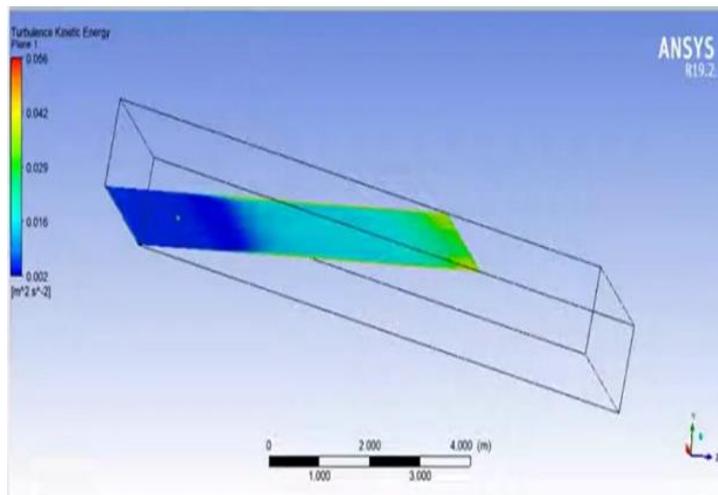
En la Figura 3 se analiza la energía cinética turbulenta que asocia a los remolinos en el flujo turbulento, cuyo valor es igual a 0.0048 kg·m²/s², mayor que cero y determina un flujo turbulento estable a lo largo de la subcuenca. Esto se puede observar en la simulación desarrollada en ANSYS, observando según la coloración de valores a lo largo del trayecto de río.

Figura 3. Factor de Eddy Comossition de la subcuenca



Fuente. Elaboración propia

Figura 4. Energía cinética turbulenta del afluyente



Fuente. Elaboración propia

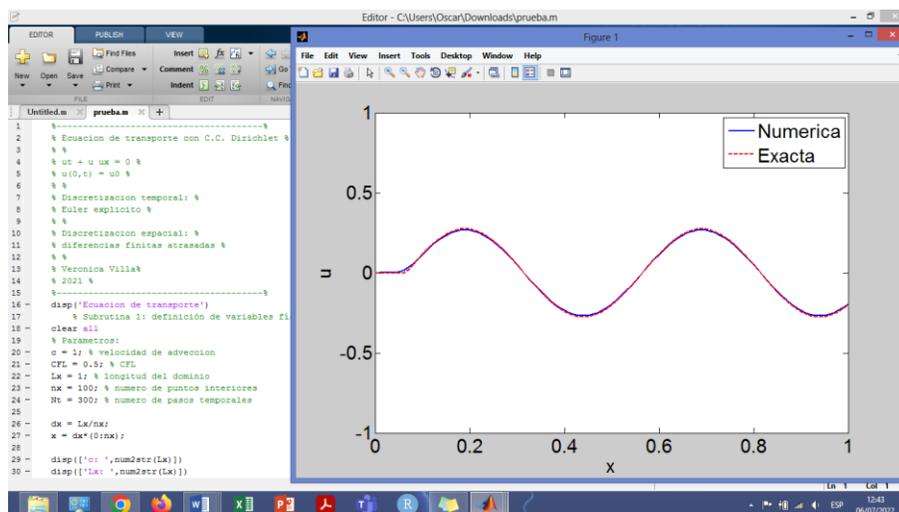
Análisis del Modelo de Simulación

El análisis, implementación y simulación, del modelo se realizó en Matlab R2013 desarrollado por Cleve Moler en México, para lo cual se consideró el tipo de flujo en régimen turbulento a lo largo del río Chambo resultado tomado de la simulación en ANSYS (figura 3), se consideró los parámetros de profundidad y longitud uniforme. Esto con el fin de analizar la concentración de sedimentos que son transportados a lo largo del caudal, el modelo conformado por dos componentes: difusión y advección, sin embargo, en este estudio se pretende modelar solo con el parámetro de advección y se establece un valor para el término de Courant-Friedrichs-Lewy, esto como una condición de convergencia para las ecuaciones diferenciales usado en derivadas

parciales. Asumimos el caudal líquido como compresible con el fin de mantener la viscosidad y densidad constantes, considerando una temperatura donde las propiedades físicas no tengan cambios significativos. Así mismo se asume la condición de no deslizamiento, lo cual es un criterio habitual para los fluidos viscosos, esto fue para dar prioridad al sistema solidario con el fluido nulo y velocidad relativa entre la extensión del sólido analizado.

El algoritmo fue desarrollado en Matlab, dividido en varias rutinas en la cual se generó una solución exacta y una solución numérica, para ello se empleó la condición inicial de $\bar{C} = 0.275$ (la concentración estimada de partículas de fondo es $\bar{C} = 0.275$ (27.5 %) (tabla 2)). La comparación de las dos soluciones planteadas se puede observar en la Figura 5, 6 y 7, donde x representa el paso de tiempo y u representa el promedio de partículas sólidas del modelo numérico y del modelo exacto. Los resultados de la simulación muestran una oscilación de la concentración de sedimentos tanto del modelo exacto como del numérico, y después de un determinado tiempo se estabiliza viajando a lo largo del caudal. Además, se observa que al final la concentración de estas partículas se disipa o reduce, por ello se planteó que una parte significativa de las partículas materiales se sedimentan y esto puede provocar un fenómeno de socavación, reducción del volumen de agua, disminución de la profundidad del agua, entre otros.

Figura 5. a) Simulación de concentración de partículas de material sólido

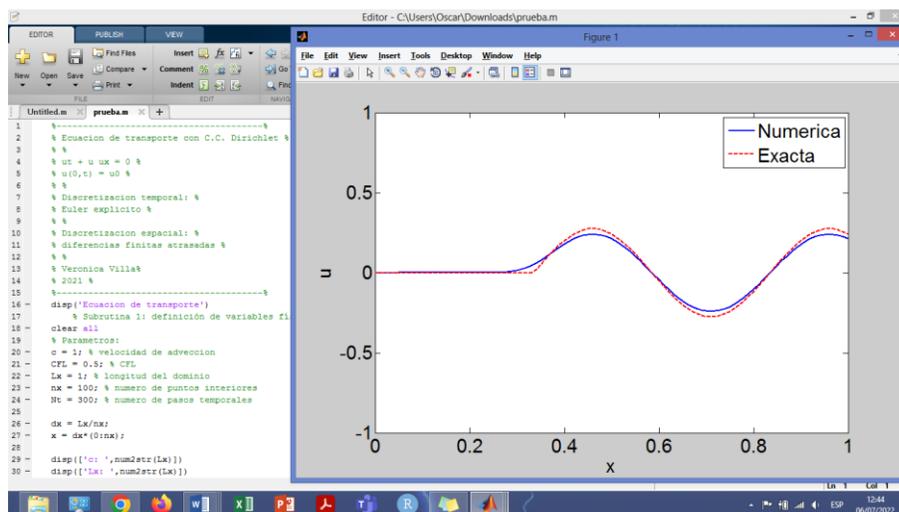


Fuente. Elaboración propia

Dentro de la simulación se consideró dos condiciones de frontera, una que está relacionada a la consistencia matemática por tener resultados oscilatorios y otra que está asociada al fenómeno físico ya que la concentración de sedimentos se encuentra bajo un régimen turbulento estacionario,

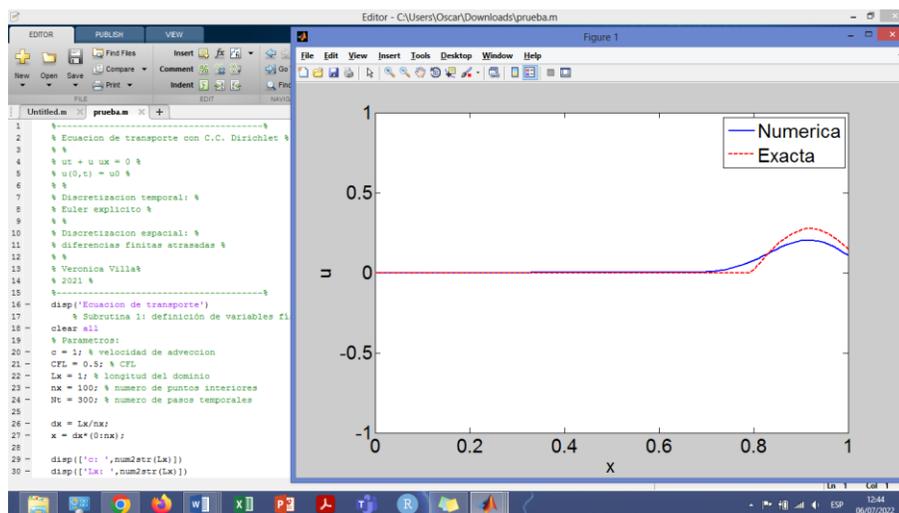
sin embargo, se asume un caudal líquido con viscosidad y densidad constante, debido a esto también se tomó el coeficiente de difusión en un régimen estacionario lo que indica que no existe variaciones bruscas en los estados difusivos. Además, la simulación tomó en cuenta una sola dimensión, lo cual limita cientos casos de estudio, por lo que se modeló solo el transporte de caudal sólido de partículas, éstas viajan en un sistema solidario en función de la pendiente longitudinal en una sola dirección a lo largo de la subcuenca este caso aplica para la Figura 6 y 7.

Figura 6. b) Simulación de concentración de partículas de material sólido



Fuente. Elaboración propia

Las soluciones obtenidas al aplicar el modelo numérico y exacto permitieron el cálculo de su error mediante la diferenciación entre el valor exacto y el numérico. Obteniendo un error de 0,053 y se comprueba la no significancia del error, de lo expuesto se afirma que los resultados obtenidos para \bar{C} utilizando el método numérico planteado es óptimo y estable de manera lineal en función del tiempo. Además, se garantiza la consistencia mediante los esquemas de Preismman (Samuels & Skeels, 1990).

Figura 7. c) Simulación de concentración de partículas de material sólido

Fuente. Elaboración propia

Discusión

Investigaciones referentes al transporte de sedimentos al largo del río Chambo son escasos y según lo afirmado por Abad et al., (2008), existe una gran dificultad al momento de plantear los modelos físicos o matemáticos, por lo que se planteó como primer modelo que simula el transporte de partículas materiales considerando en su ecuación solamente el término de advección, con pendiente longitudinal (23,95%) y velocidad (16,16 m/s) uniformes o constantes. El análisis de errores entre el modelo numérico y el modelo exacto desarrollado en Matlab cuantificó un error aproximado de $e = 0.053$, el valor calculado resultó no significativo concluyendo la estabilidad del modelo de simulación desarrollado y permitiendo la confiabilidad de los resultados, de acuerdo con Rodríguez et al., (2019) el estudio mostró altas incertidumbres debido a problemas presentados durante la recolección de datos y los métodos empleados, la simulación fue ejecutado en el software HEC-RAS con información recolectada del río Garrapata-Chone, aunque en esta investigación la incertidumbre fue baja no significa que el modelo sea excelente. Los resultados mostraron una oscilación para el modelo numérico y exacto, luego de un tiempo las partículas materiales se reducen lo que significa que a lo largo del trayecto se sedimentan y puede ocasionar problemas de socavación, reducción del volumen de agua, disminución de la profundidad del agua. Detectar estos problemas es de gran importancia al momento de abordar temas de conservación del medio y asegurar la calidad de vidas en zonas bajas del río.

Conclusiones

El sistema de flujo de la cuenca del río Chambo resultó tener un régimen aproximadamente estacionario según el factor de turbulencia y los resultados mostraron una oscilación tanto para el modelo numérico y exacto, luego de un tiempo estas partículas disminuyen lo que significa que a lo largo del trayecto se sedimentan. El análisis de errores entre el modelo numérico y el modelo exacto cuantificó un error aproximado de $e = 0.053$, el valor calculado resultó no significativo concluyendo la estabilidad del modelo de simulación desarrollado y permitiendo la confiabilidad de los resultados. Sin embargo, este estudio no consideró el término difusivo dentro del modelo por lo que es recomendable realizar estudios que permitan mejorar la sensibilidad del modelo con la inclusión de nuevos parámetros

Referencias

- Abad, J., Buscaglia, G., & Garcia, M. (2008). 2D stream hydrodynamic, sediment transport and bed morphology model for engineering applications. *HYDROLOGICAL PROCESSES*(22), 1443–1459. <https://doi.org/10.1002/hyp.6697>
- Aksoy, H., Mahe, G., & Meddi, M. (2019). Modeling and Practice of Erosion and Sediment Transport under Change. *Water*, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w11081665>
- Arias, H., & Pérez, M. (2018). ESTUDIO HIDRÁULICO DEL RÍO CHAMBO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTANCIA ENTRE RÍO-ACUÍFERO Y ZONAS DE INUNDACIÓN. (Tesis, UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO), Riobamba. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4876#:~:text=Repositorio%20Digital%20UNACH%3A%20Estudio%20hidr%C3%A1ulico,acu%C3%ADfero%20y%20zonas%20de%20inundaci%C3%B3n>
- Arias, H., & Pérez, M. (2018). Estudio Hidráulico del río Chambo para la determinación de la conductancia entre río- acuífero y zonas de inundación. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4876>
- Basri, H., Azmeri, A., Wesli, W., & Jemi, F. (2020). Simulation of sediment transport in Krueng Baro River, Indonesia. *Journal of Disaster Risk Studies*, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.4102/jamba.v12i1.934>

- Childress, S., Hosoi, A., Schultz, W., & Wang, J. (2012). *atural Locomotion in Fluids and on Surfaces: Swimming, Flying, and Sliding*. Springer Science+Busines. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3997-4>
- Consejo Nacional de Recursos Hídricos, C. (2007). Estudio hidrológico de la subcuenca del río Chambo e implementación de un modelo hidrológico. Informe ejecutivo. Oficina del Subproceso de Estudio y Regulaciones para la Administración del Agua. <http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/estarecua.html>
- Cusipuma, M., Kuroiwa, J., & Castro, L. (2018). SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO MADRE DE DIOS. XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA. Buenos Aires. https://www.researchgate.net/profile/Luis-Castro-13/publication/327903303_SIMULACION_NUMERICA_DE_LA_HIDRODINAMICA_Y_TRANSPORTE_DE_SEDIMENTOS_EN_EL_MODELO_HIDRAULICO_DEL_RIO_MADRE_DE_DIOS/links/5d327e9192851cd046758dbe/SIMULACION-NUMERICA-DE-LA-HIDRODINAMI
- García, M., & Maza, J. (1996). *Manual de Ingeniería de Ríos*. México: Series del Instituto.
- Godoy, S., González, J., & Viñan, J. (2020). Estudio del impacto de sostenibilidad del tratamiento de los sedimentos del río Chibunga. *Dominio de las ciencias*, 6(2), 442-463. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1227>
- Haberman, R. (2003). *Ecuaciones en derivadas parciales con serie de Fourier y problemas de contorno*. New York: Pretince Hall.
- Hajjgholizadeh, M., Melesse, A., & Fuentes, H. (2018). Erosion and Sediment Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications. *Environmental Research and Public Health*, 15(518). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15030518>
- Hamming, W. (1987). *Numerical Methods for Scientists and Engineers*. Londres: Dover Publications.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. New York: Butterworth Heinemann.

- Lepesqueur, J., Hostache, R., Martínez, N., Montargès, E., & Hissler, C. (2018). Sediment transport modelling in riverine environments: on the importance of grain-size distribution, sediment density and boundary conditions. *Hydrology Earth System Sciences Discussions*, 3901–3915. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-511>
- Rodríguez, R., Giler, A., Félix, J., & Alarcón, J. (2019). SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO DE FONDO DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO GARRAPATA CANTÓN CHONE. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. https://www.researchgate.net/profile/Andy-Giler-Ormaza/publication/339150090_Bedload_sediment_transport_simulation_Case_study_at_Garrapata_River_in_the_Ecuadorean_coastal_region/links/5e41d3f6458515072d919532/Bedload-sediment-transport-simulation-Case-stu
- Samuels, P., & Skeels, C. (1990). Stability Limist for Preissmann's Scheme. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(8), 997-1012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:8\(997\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:8(997))
- Torres, F., González, J., Naranjo, M., & Martínez, J. (2022). MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL DELTA DEL RÍO SINÚ, COLOMBIA. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 38, 25-40. <https://doi.org/10.20937/RICA.54337>