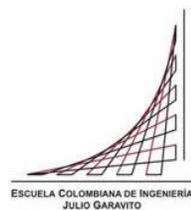


Maestría en Ingeniería Civil

Evaluación del transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos. Caso de estudio en el departamento del Cesar: arroyo San Antonio

María Fernanda Latouche Facenda

Bogotá, D.C., 10 de mayo de 2023



Evaluación del transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos. Caso de estudio en el departamento del Cesar: arroyo San Antonio

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Director

Bogotá, D.C., 10 de mayo de 2023



La tesis de maestría titulada “Evaluación del transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos. Caso de estudio en el departamento del Cesar: arroyo San Antonio”, presentada por María Fernanda Latouche Facenda, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Andrés Humberto Otálora Carmona

Bogotá, D.C., 10 de mayo de 2023

A mi madre y a mi padre,
por apoyarme y siempre estar para mí.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por brindarme la oportunidad de estudiar en este programa de maestría y por el apoyo académico y financiero que me ha proporcionado.

A mi director de tesis, el ingeniero Alfonso Rodríguez, por su paciencia, orientación y guía experta durante el proceso de investigación y escritura.

A mis compañeros de trabajo: Andrés, Andrea, Mónica y Juan, por su amistad, apoyo y comprensión durante esta etapa de mi vida académica.

Finalmente, a mis padres, Yetzabel y Ricardo, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus sacrificios constantes para ayudarme a lograr mis metas. Sus palabras de aliento y su motivación han sido mi fuerza durante este proceso. A ellos les debo todo mi éxito.

A todos, gracias por haber sido una parte importante de mi experiencia en este programa de maestría. Sin su ayuda, este logro no hubiera sido posible.

Resumen

El transporte de sedimentos es un proceso natural que tiene gran importancia en procesos hidráulicos, geomorfológicos y ecológicos de los cuerpos de agua (IDEAM, 2007). La dinámica de los sedimentos genera condiciones favorables de biodiversidad a lo largo del río, desde su inicio hasta la zona costera (González Parra & Moreno Barco, 2022).

La presente tesis tiene como objetivo desarrollar una metodología para la evaluación del transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos, con el fin de estimar los cambios en el perfil y las secciones transversales del cauce. Para su elaboración se tomaron como referencia los documentos “Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua” (IDEAM) y “Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). En la metodología propuesta se explican los pasos necesarios para elaborar un modelo de transporte de sedimentos unidimensional empleando el *software* HEC-RAS.

A partir de la guía metodológica presentada se elaboraron dos modelos de transporte de sedimentos que evalúan la condición actual y futura de un tramo del arroyo San Antonio, ubicado en la zona del proyecto minero La Loma, en el departamento del Cesar, Colombia. En general, los resultados obtenidos de las modelaciones para la condición futura muestran que los cambios que ocurrirían aguas abajo de la entrega del realineamiento definitivo del arroyo San Antonio son muy similares a los que ocurrirían aguas abajo del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio, que corresponde a la condición actual. Sin embargo, es necesario que el modelo de transporte de sedimentos se actualice constantemente, con base en la nueva información de campo disponible.

Este proyecto es relevante en el campo de recursos hidráulicos y medio ambiente, ya que para resolverlo se necesitan conocimientos en hidráulica a superficie libre e hidráulica fluvial, y puede ser útil para la toma de decisiones en materia de gestión de cauces naturales.

Palabras claves: HEC-RAS, transporte de sedimentos, cauce aluvial, recursos hidráulicos.

Contenido

Capítulo I. Introducción	14
1.1. Objetivos	17
1.1.1. General.....	17
1.1.2. Específicos	17
Capítulo II. Revisión bibliográfica.....	19
2.1. Estado del arte	19
2.2. Marco teórico.....	23
2.2.1. Clasificación del transporte de sedimentos.....	23
2.2.2. Terminología del transporte de sedimentos	25
2.2.3. Potencia de la corriente	26
2.2.4. Movimiento incipiente	27
2.2.5. Predicción sobre la respuesta general de un río al cambio. Analogía de la balanza de Lane	31
2.2.6. Cuantificación del potencial de transporte de sedimentos	33
2.2.7. Ecuaciones de transporte de sedimentos	35
2.3. Medida del transporte de sedimentos. Normas y guías	65
2.3.1. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua (IDEAM)	65
2.3.2. Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Minambiente) .	66
2.4. Cálculo del transporte de sedimentos. Modelo HEC-RAS 1D	68
2.4.1. Estructura del modelo.....	68
2.4.2. Funciones de transporte de sedimentos	69
2.4.3. Ecuaciones del modelo.....	71

2.4.4.	Ventajas y limitaciones	74
Capítulo III.	Propuesta metodológica para el análisis de transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos.....	76
3.1.	Información de campo. Recopilación de información	77
3.1.1.	Información geométrica	77
3.1.2.	Información hidráulica.....	77
3.1.3.	Información de sedimentos.....	78
3.2.	Modelo hidráulico unidimensional	79
3.2.1.	Elaboración del archivo de geometría.....	79
3.2.2.	Elaboración del archivo de caudales con flujo permanente.....	79
3.2.3.	Calibración del modelo hidráulico	79
3.3.	Modelo de transporte de sedimentos unidimensional	80
3.3.1.	Elaboración del archivo de caudales con flujo cuasi no-permanente	80
3.3.2.	Elaboración del archivo de características de sedimentos. Selección de ecuaciones de transporte.....	81
3.3.3.	Ejecución del plan de transporte de sedimentos.....	86
3.3.4.	Calibración del modelo de transporte de sedimentos.....	86
3.3.5.	Utilización del modelo para los análisis correspondientes.....	87
Capítulo IV.	Caso de estudio en el departamento del Cesar: arroyo San Antonio.....	88
4.1.	Generalidades	88
4.2.	Recopilación de la información de campo.....	89
4.3.	Modelo de la condición actual.....	91
4.3.1.	Modelo hidráulico de la condición actual.....	91
4.3.2.	Modelo de transporte de sedimentos de la condición actual	95
4.4.	Modelo de la condición futura	103
4.4.1.	Modelo hidráulico de la condición futura	103

4.4.2. Modelo de transporte de sedimentos de la condición futura	104
4.5. Resultados de las modelaciones	108
4.5.1. Perfil longitudinal	108
4.5.2. Secciones transversales.....	110
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	116
Referencias	119

Índice de tablas

Tabla 1. Efectos adversos debido a intervenciones antrópicas en los ríos.....	15
Tabla 2. Modelos computacionales para la evaluación del transporte de sedimentos.....	20
Tabla 3. Criterios de decisión para la selección de simulaciones con flujo quasi-no permanente o flujo no permanente	21
Tabla 4. Funciones de potencial de transporte de sedimentos en HEC-RAS 1D.	70
Tabla 5. Resumen de la información obtenida de las campañas de aforos líquidos y sólidos	90
Tabla 6. Ubicación de los afluentes en las secciones de la condición actual	96
Tabla 7. Curvas granulométricas del material del lecho asignadas a las secciones transversales de la condición actual	98
Tabla 8. Resultados de la calibración del modelo de transporte de sedimentos de la condición actual	102
Tabla 9. Ubicación de los afluentes en las secciones de la condición futura.....	105
Tabla 10. Curvas granulométricas del material del lecho asignadas a las secciones transversales de la condición futura.....	106
Tabla 11. Cambio relativo de la cota del fondo del canal para 1, 5 y 10 años de la simulación. Condición actual y condición futura.....	111

Índice de figuras

Figura 1. Árbol del problema.....	17
Figura 2. Análisis de los documentos de la base de datos Scopus.	19
Figura 3. Modos de transporte de sedimentos.	24
Figura 4. Clasificación del transporte de sedimentos	24
Figura 5. Carga total de sedimentos..	26
Figura 6. Análisis de fuerzas para el estudio del movimiento incipiente.	28
Figura 7. Diagrama de Shields.....	31
Figura 8. Analogía de la balanza de Lane.....	33
Figura 9. Esquema del modelo de carga de fondo de DuBoys.....	36
Figura 10. Parámetros de sedimento y esfuerzo cortante crítico para la ecuación de DuBoys: a) Sistema inglés, b) Sistema internacional.	37
Figura 11. Ecuación de Kalinske de carga por arrastre.....	40
Figura 12. Valores de K_t para diferentes tamaños de arena.....	41
Figura 13. Forma de fondo moviéndose aguas abajo.	45
Figura 14. Factor de corrección en la distribución logarítmica de velocidades.	49
Figura 15. Factores de corrección de la ecuación de Einstein de transporte por arrastre.	51
Figura 16. Relación entre ψ^* y ϕ^* de la ecuación de Einstein de transporte por arrastre.	52
Figura 17. Distribución de velocidades y de la concentración de sedimentos en suspensión.	54
Figura 18. Relación entre PL y ωU^*	59
Figura 19. Funciones de I_1 y I_2 de la ecuación de Einstein de carga en suspensión.....	60
Figura 20. Función de transporte de carga en suspensión de Brooks.....	61
Figura 21. Relaciones de Toffaleti de la velocidad, concentración y carga de sedimentos.	64
Figura 22. Tipos de muestreadores de material en suspensión.	66
Figura 23. Propuesta de lineamientos para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica.....	67
Figura 24. Estructura de los archivos para modelos de transporte de sedimentos con flujo cuasi-no permanente y con flujo no permanente.....	69

Figura 25. Acoplamiento entre las características hidráulicas y de sedimentos.	72
Figura 26. Volumen de control de sedimentos.	74
Figura 27. Propuesta metodológica para el análisis de transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos.	76
Figura 28. Esquema del cambio del caudal en el tramo de estudio asociado a la ubicación del caudal lateral.	81
Figura 29. Editor de información de sedimentos en HEC-RAS.	82
Figura 30. Volumen de control de sedimentos (Max Depth or Min Elev).	83
Figura 31. Volumen de control de sedimentos (Movable bed).	83
Figura 32. Esquema de la condición actual y la condición futura del tramo en estudio del arroyo San Antonio.	89
Figura 33. Geometría del modelo de la condición actual. Superficie de coeficientes de rugosidad de Manning.	92
Figura 34. Caudales líquidos modelados en flujo permanente para el modelo de la condición actual.	93
Figura 35. Condiciones de frontera hidráulica del modelo de la condición actual.	93
Figura 36. Comparación entre los niveles de la lámina de agua medidos en campo y los niveles de agua resultados del modelo hidráulico para los mismos caudales. Calibración del modelo.	94
Figura 37. Series de caudales para la modelación de transporte de sedimentos.	95
Figura 38. Condiciones hidráulicas de frontera aguas arriba y aguas abajo del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio. Modelo en HEC-RAS para la condición actual.	96
Figura 39. Granulometría del material del lecho del canal de realineamiento No. 4 y del cauce natural del arroyo San Antonio.	97
Figura 40. Datos de la curva de calibración caudales líquidos - caudales sólidos.	99
Figura 41. Opciones del cambio del lecho del modelo de la condición actual.	100
Figura 42. Plan de transporte de sedimentos del modelo de la condición actual.	100
Figura 43. Curva de calibración de caudales sólidos y líquidos. Estación LM28.	102
Figura 44. Topología y geometría del modelo hidráulico para la condición futura. Trazado en planta y secciones transversales.	104

Figura 45. Condiciones hidráulicas de frontera aguas arriba y aguas abajo del realineamiento definitivo del arroyo San Antonio. Modelo en HEC-RAS para la condición futura.	105
Figura 46. Plan de transporte de sedimentos del modelo de la condición futura.	107
Figura 47. Elevación del fondo del canal. Condición actual y condición futura.	108
Figura 48. Cambio relativo de la cota del fondo del canal. Condición actual y condición futura.	109
Figura 49. Cambio en la masa del lecho acumulada a lo largo del cauce (lectura de derecha a izquierda). Condición actual y condición futura.	109
Figura 50. Secciones transversales analizadas aguas arriba y aguas abajo de la intervención.	110
Figura 51. Cambio relativo de la cota del fondo del canal. Ubicación de la entrega del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio al cauce natural, para la condición actual y la condición futura.	112
Figura 52. Secciones transversales aguas arriba de la intervención. Condición actual y condición futura.	113
Figura 53. Secciones transversales aguas abajo de la intervención. Condición actual y condición futura.	115

Índice de anexos

Anexo 1. Información de campo	123
Anexo 2. Modelo HEC-RAS	124

Capítulo I. Introducción

Se entiende por sedimentos a todas las partículas de suelo y roca de una cuenca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua (Maza Álvarez & García Flores, 1998). Los sedimentos transportados por un cauce pueden provenir de dos fuentes (Rodríguez Díaz, 2010):

- Cuenca: generados por la erosión de la superficie del terreno de la cuenca hidrográfica, debido a la acción del viento y la lluvia.
- Lecho: generados por la erosión del cauce principal y sus tributarios.

La hidrodinámica natural de los ríos mantiene un equilibrio dinámico (Brils, 2008), los cauces y las llanuras de inundación de los ríos se ajustan constantemente a la cantidad de agua y sedimentos suministrados por la cuenca. Los cambios diarios en el caudal y en la carga de sedimentos resultan en un ajuste frecuente de las formas del lecho y la rugosidad en muchos cauces con lechos móviles. Los cauces también se ajustan periódicamente a eventos extremos de caudales altos y bajos (Bernard & Tuttle, 1998).

El transporte de sedimentos es un proceso natural que tiene gran importancia en los procesos hidráulicos, geomorfológicos y ecológicos de los cuerpos de agua (IDEAM, 2007). La dinámica de los sedimentos genera condiciones favorables de biodiversidad a lo largo del río, desde su inicio hasta la zona costera. Los sedimentos tienen un alto valor ecológico, ya que allí vive una gran cantidad de especies acuáticas (González Parra & Moreno Barco, 2022). Además, los sedimentos de los sistemas fluviales se utilizan como tierra de cultivo fértil y fuente de material de construcción (Brils, 2008).

Actualmente, la mayoría de cuerpos de agua en el mundo (ríos, embalses y lagos) ya no se encuentran en su estado morfodinámico natural, debido a las intervenciones antrópicas tanto en la cuenca como en el río (Wieprecht et al., 2016). Estas actividades humanas (la construcción de presas, el desarrollo de actividades mineras, la modificación de los usos y las coberturas del suelo para el desarrollo de diversas actividades económicas, la explotación de materiales aluviales) modifican los procesos de transporte de sedimentos, alterando el equilibrio natural de los cauces y generando problemas tanto en los sitios intervenidos como aguas abajo (González Parra & Moreno Barco, 2022).

Algunos de los efectos adversos que se pueden generar debido a excesos o déficit de sedimentos se presentan a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Efectos adversos debido a intervenciones antrópicas en los ríos

Exceso de sedimentos (deposición)	Déficit de sedimentos (erosión)
Disminución en la navegabilidad del cauce	Pérdida de productividad en cultivos
Pérdida de vida útil en embalses	Erosión en las costas
Contaminación del agua	Erosión de las orillas del río
Mayor susceptibilidad a inundaciones	Pérdida de humedales
Turbiedad	
Deterioro de estructuras hidráulicas	

Fuente: adaptado de (Brils, 2008) (González Parra & Moreno Barco, 2022)

Los problemas relacionados con el transporte de sedimentos son asuntos de interés mundial. Según un análisis preliminar publicado por el International Research and Training Centre on Erosion and Sedimentation (IRCTES), la erosión anual del suelo de las cuencas fluviales del mundo asciende a 60.000 millones de toneladas. Anualmente se deterioran entre 5 y 7 millones de hectáreas de tierras de cultivo y se pierde cerca del 1% de la capacidad de almacenamiento de los embalses debido a la deposición de sedimentos, lo cual provoca una mayor susceptibilidad ante eventos de inundaciones y sequías y el deterioro de los ecosistemas (IRTCES, 2015). Adicionalmente, la disminución de la vida útil de los embalses como consecuencia de la colmatación genera pérdidas económicas (Brils, 2008).

Entendiendo la importancia y la complejidad del estudio del transporte de sedimentos, el International Hydrological Programme (IHP) de la UNESCO aprobó la International Sediment Initiative (ISI) en el año 2002 (Liu et al., 2017), con el objetivo de fomentar la cooperación internacional en la gestión de los problemas regionales de sedimentos y en la búsqueda de soluciones locales (UNESCO, 2011). La ISI busca gestionar de forma sostenible los recursos de suelo, sedimentos y agua para disminuir los impactos socioeconómicos y ecológicos de la erosión y la sedimentación; además, tiene por objetivo ofrecer un mejor asesoramiento para la elaboración y aplicación de políticas (UNESCO, 2011).

En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible publicó en el 2022 un documento llamado “Lineamientos generales para el manejo de sedimentos de la gestión integral hidrográfica en el marco a nivel de cuenca del recurso hídrico”, con el fin de establecer unas recomendaciones generales de los contenidos mínimos que debe tener el análisis de sedimentos a escala de cuenca (González Parra & Moreno Barco, 2022), y a partir de este análisis generar estrategias para el manejo de sedimentos.

Para analizar este problema se plantean las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo se evalúa el transporte de sedimentos en el mundo? ¿Cómo se evalúa el transporte de sedimentos en Colombia? ¿Cuáles son las normas o guías que regulan el análisis de transporte de sedimentos? ¿Cuáles son las características sedimentológicas de los principales ríos en Colombia? ¿Qué datos se necesitan para realizar un modelo de transporte de sedimentos? Si se tuviese una metodología para evaluar el transporte de sedimentos en cauces aluviales pequeños y medianos se podrían tomar decisiones de gestión con base en los resultados de dicha evaluación.

Bajo la hipótesis planteada, el presente proyecto propone definir una metodología para la evaluación del transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos, aplicada a un caso de estudio en Colombia, correspondiente a un tramo del arroyo San Antonio en el departamento del Cesar.

Este proyecto es relevante en el campo de los recursos hidráulicos y medio ambiente, ya que para resolverlo se necesitan conocimientos en hidráulica a superficie libre e hidráulica fluvial, para identificar zonas de sedimentación y erosión en cauces aluviales. El presente proyecto está enfocado en la línea de investigación de modelación física y numérica de los recursos hidráulicos de la institución.



Figura 1. Árbol del problema.

En el capítulo II se presenta la revisión bibliográfica de la investigación, que incluye el estado del arte y el marco teórico con los conceptos necesarios para su desarrollo. En el capítulo III se describe una propuesta metodológica para el análisis del transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos. En el capítulo IV se desarrolla un caso de estudio correspondiente al arroyo San Antonio en el departamento del Cesar, aplicando la propuesta metodológica definida en el capítulo anterior. Finalmente, se plantean conclusiones y recomendaciones con base en los resultados obtenidos del modelo de transporte de sedimentos del caso de estudio.

1.1. Objetivos

1.1.1. General

Desarrollar una metodología para la evaluación del transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos. Caso de estudio en el departamento del Cesar: arroyo San Antonio.

1.1.2. Específicos

- Identificar las normas y guías referentes a la evaluación del transporte de sedimentos en cauces aluviales.

- Definir una propuesta metodológica para el análisis de transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos.
- Realizar la modelación de transporte de sedimentos (física y numérica) de un caso de estudio en el departamento Cesar, correspondiente a un tramo del arroyo San Antonio.
- Redactar un documento final que muestre el proceso del desarrollo del modelo, los resultados obtenidos con sus respectivos análisis y conclusiones.

Capítulo II. Revisión bibliográfica

2.1. Estado del arte

Los criterios de inclusión de documentos para la revisión del estado del arte comprenden los redactados en inglés, los que cuantifiquen a partir de mediciones en campo el transporte de sedimentos en cauces y aquellos que modelen el transporte de sedimentos en cauces. Se excluyen publicaciones anteriores al 2012, artículos de revisión bibliográfica y documentos que no se enfoquen en el transporte de sedimentos.

La búsqueda se realizó en la base de datos Scopus, utilizando la lógica booleana a partir de las siguientes palabras claves: TITLE-ABS-KEY (sediment AND transport AND (channel OR river)) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Rivers")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Sediment Transport")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Numerical Models")). El resultado de la búsqueda arrojó 279 documentos, que al limitarlos a publicaciones realizadas a partir del año 2012, se redujo a 196 (1-196). En la bibliografía analizada se encontraron 10 documentos adicionales útiles para el proyecto (197-207). A continuación se muestran los documentos por año, país y tipo (Figura 2).

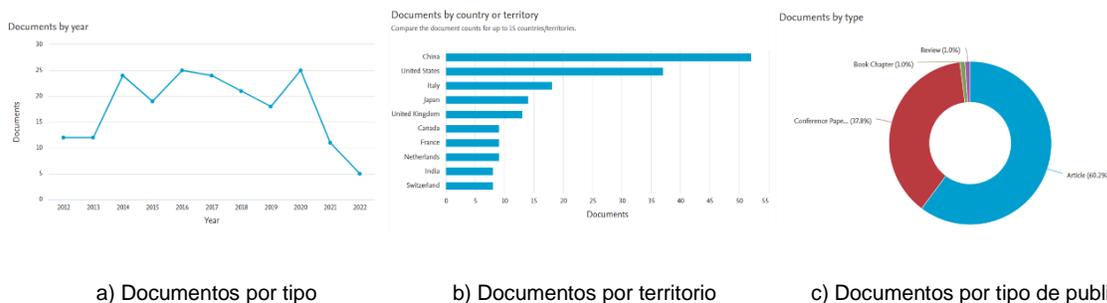


Figura 2. Análisis de los documentos de la base de datos Scopus. Fuente: elaboración propia.

En la figura anterior se observa que a partir del año 2012 aumentó el número de documentos publicados; sin embargo, desde el año 2020 (que corresponde con el inicio de la pandemia de Covid-19) hubo una disminución en las publicaciones sobre el tema en estudio. La mayoría de estas publicaciones se han desarrollado en China y Estados Unidos. Principalmente son artículos (60,2%) y documentos de conferencias (37,8%).

Para evaluar el transporte de sedimentos se han utilizado diferentes modelos matemáticos con el fin de identificar procesos de sedimentación y erosión en los cauces. El *software* HEC-RAS, desarrollado por el US Army Corps of Engineers, es uno de los modelos más utilizados para este tipo de evaluación ((Joshi et al., 2019) Dahl et al., 2018; Chevalier et al., 2021, y Tarar et al., 2019). En Colombia se han realizado modelaciones de transporte de sedimentos del río Sinú con el modelo EFDC (Torres-Bejarano et al., 2022), del río Cauca con MIKE11 (Ramirez et al., 2011) y del río Magdalena con IBER (Calderón Colorado, 2021). En la Tabla 2 se presentan algunos modelos matemáticos que permiten la modelación de transporte de sedimentos y sus características.

Tabla 2. Modelos computacionales para la evaluación del transporte de sedimentos

Nombre	Desarrollador	País	Tipo de licencia	Características
HEC-6	US Army Corps of Engineers	Estados Unidos	Libre	Modelación en 1D. Flujo quasi-no permanente. Antecesor del módulo de transporte de sedimentos de HEC-RAS (Dahl et al., 2018).
HEC-RAS	US Army Corps of Engineers	Estados Unidos	Libre	Modelación en 1D y 2D. Flujo quasi-no permanente y flujo permanente. Permite estimar el transporte de sedimentos para materiales cohesivos y no cohesivos (Dahl et al., 2018).
IBER	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)	España	Libre	Modelación en 2D. Flujo no permanente. Compuesto por tres módulos: hidrodinámico, de turbulencia y de transporte de sedimentos (Iber, 2014).
MIKE HYDRO River	Danish Hydraulic Institute (DHI)	Dinamarca	Comercial	Modelación de ríos en 1D. Permite estimar el transporte de sedimentos para materiales cohesivos y no cohesivos. Es el sucesor del modelo Mike 11 (Hydro, 2012).
EFDC Explorer (3D)	United States Environmental Protection Agency (EPA)	Estados Unidos	Libre	Modelación de hidráulica a superficie libre en 1D, 2D y 3D. Incluye módulos de modelación hidrodinámica, contaminante-sedimentos y componentes eutrofización (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2021).

Fuente: elaboración propia.

Los modelos unidimensionales se utilizan más que los bidimensionales o tridimensionales, debido a su facilidad de uso y por la menor cantidad de información que

requieren para su elaboración (Restrepo-López et al., 2015). HEC-RAS se trata de un *software* de licencia libre y en constante proceso de actualización, gracias a las continuas mejoras que el Hydrologic Engineering Centre le realiza al programa (Benayas Polo, 2015), razón por la cual se utiliza comúnmente en el análisis hidráulico y sedimentológico de ríos.

En un modelo de HEC-RAS de transporte de sedimentos se puede realizar la modelación hidráulica con flujo quasi-no permanente o con flujo no permanente. En la primera se resuelve la ecuación de flujo permanente, asumiendo un caudal constante en un intervalo de tiempo dado, mientras que con flujo no permanente se resuelven implícitamente las ecuaciones de Saint-Venant (U.S. Army Corps of Engineers, 2016a). En la Tabla 3 se resumen los beneficios y desventajas de estos enfoques (U.S. Army Corps of Engineers, 2016a). En un estudio realizado para un cauce efímero se compararon los resultados obtenidos al hacer la modelación con flujo no permanente y con flujo quasi-no permanente, y se obtuvo que la simulación con flujo no permanente no mejoraba significativamente los resultados del modelo (Hummel et al., 2012).

Tabla 3. Criterios de decisión para la selección de simulaciones con flujo quasi-no permanente o flujo no permanente

Quasi-no permanente	No permanente
Resuelve las ecuaciones de flujo permanente para una serie de caudales con tiempos asociados (un histograma).	Resuelve las ecuaciones de Saint-Venant implícitamente
No conserva el caudal ni tiene en cuenta el almacenamiento.	Conserva el caudal y tiene en cuenta el almacenamiento en embalses.
Más estable.	Menos estable. El cambio en la geometría del lecho puede exacerbar las inestabilidades del modelo, comunes a la solución de las ecuaciones de Saint-Venant.
Menor costo computacional.	Mayor costo computacional.
Limitado a las opciones de flujo permanente.	Condiciones de frontera hidráulicas más complejas (interflujo de aguas subterráneas, reglas de operación, estructuras laterales, controles de compuertas internas, bombas y otros).

Fuente: HEC-RAS 1D Sediment Transport User's Manual (U.S. Army Corps of Engineers, 2016a).

En el modelo se deben definir condiciones de fronteras hidráulicas, que aguas arriba corresponde a una serie de caudales con un intervalo de tiempo definido, siendo

generalmente los caudales diarios los más utilizados (Torres-Bejarano et al., 2022; Ramírez et al., 2011;) Joshi et al., 2019 & Dahl et al., 2018). Para la condición de frontera aguas abajo, dependiendo de la información disponible, se han utilizado series de niveles de la lámina de agua (Calderón Colorado, 2021; Joshi et al., 2019; Dahl et al., 2018, & M. Horvat & Horvat, 2020), la curva de calibración de caudal-nivel de la lámina de agua (Ramírez et al., 2011) y la profundidad normal (Hummel et al., 2012).

Además de la información hidráulica, el modelo necesita información de sedimentos, cuya condición inicial corresponde a la granulometría del material del lecho, con la cual determina el potencial de transporte de sedimentos. La condición de frontera de sedimentos aguas arriba más utilizada es una curva de calibración entre caudal líquido y caudal sólido (Joshi et al., 2019; Dahl et al., 2018; Chevalier et al., 2021, & M. Horvat & Horvat, 2020).

El caudal sólido está compuesto por el material transportado por arrastre y el material en suspensión. El aforo del material en suspensión es relativamente sencillo; sin embargo, resulta difícil tomar muestras representativas del material por arrastre (Food and Agriculture Organization of the United States (FAO), s.f.), razón por la cual normalmente se tienen más datos del caudal sólido en suspensión que del sólido por arrastre. Entre las estrategias utilizadas para completar la información de caudal sólido por arrastre faltante están: determinar el caudal sólido por arrastre como carga de equilibrio a partir de ecuaciones de potencial de transporte (Calderón Colorado, 2021, & Dahl et al., 2018), asumir el caudal sólido por arrastre como un porcentaje del caudal sólido en suspensión (Tarar et al., 2019) y si las características del sistema fluvial lo permiten, asumir que el caudal sólido por arrastre es despreciable en comparación con el caudal sólido por suspensión y tener en cuenta únicamente este último (Chevalier et al., 2021).

La calibración del modelo consta de dos partes: calibración hidráulica y calibración del transporte de sedimentos. La primera, generalmente se hace modificando el valor del coeficiente de rugosidad n de Manning hasta que los niveles de la lámina de agua simulados sean similares a los medidos (M. Horvat & Horvat, 2020). Luego, la calibración del transporte de sedimentos se puede realizar comparando los cambios de la elevación del lecho del cauce simulados con batimetrías históricas (Ramírez et al., 2011; Dahl et al., 2018; Tarar et al., 2019, & Hummel et al., 2012) o comparando la carga de sedimentos modelada

con la carga de sedimentos medida (Joshi et al., 2019; Z. Horvat et al., 2021, & M. Horvat & Horvat, 2020).

2.2. Marco teórico

A continuación, se presentan los conceptos básicos necesarios para entender los procesos y factores que afectan el transporte de sedimentos en un cauce aluvial.

2.2.1. Clasificación del transporte de sedimentos

Se entiende por sedimentos a todas las partículas de suelo y roca de una cuenca, que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua (Maza Álvarez & García Flores, 1998). Los sedimentos transportados por un cauce pueden provenir de dos fuentes:

- **Cuenca:** generados por la erosión de la superficie del terreno de la cuenca hidrográfica, debido a la acción del viento y la lluvia.
- **Lecho:** generados por la erosión del cauce principal y sus tributarios.

Además, los sedimentos pueden ser transportados por una corriente, principalmente de las siguientes formas (Rodríguez Díaz, 2010):

- **Suspensión:** los materiales siguen los mismos movimientos del agua, se desplazan aproximadamente a la misma velocidad y se mantienen en suspensión debido a los remolinos generados por la turbulencia del flujo. En general, se trata de partículas finas (limos y arcillas), que se depositan por gravedad sólo cuando el flujo es muy lento o se estanca. Parte del material en suspensión puede ser arcilla coloidal, que puede permanecer en suspensión durante periodos de tiempo muy largos.
- **Arrastre:** el transporte de material por arrastre se realiza por la acción del esfuerzo cortante generado por la corriente sobre las partículas de sedimento. El movimiento de las partículas por arrastre puede ser de rodadura o deslizamiento sobre el lecho del cauce.
- **Saltación:** algunas partículas pueden moverse también sobre el lecho del cauce en saltación, que es un movimiento de saltos sucesivos discontinuos, se produce

cuando una partícula choca con otra, haciendo que rebote hacia arriba y caiga de nuevo hacia el lecho.

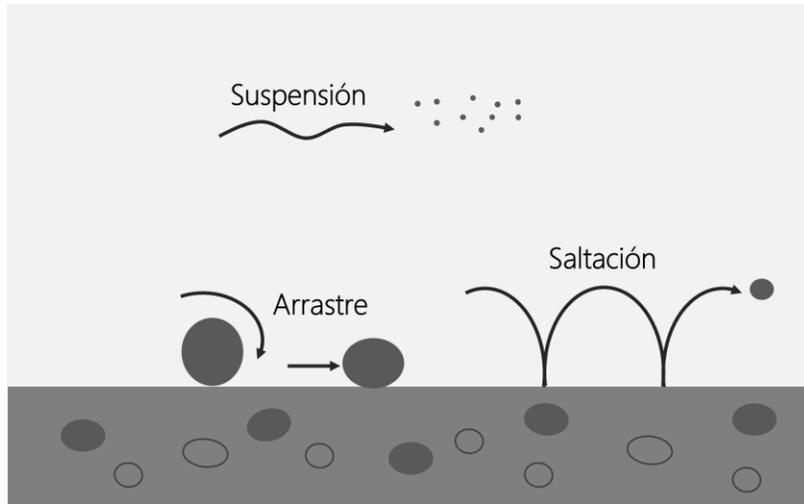


Figura 3. Modos de transporte de sedimentos. Fuente: elaboración propia.

Los sedimentos provenientes del material del lecho del cauce son transportados a lo largo del río por arrastre, y periódicamente pueden ser transportados en suspensión debido a la turbulencia del flujo. Los que provienen de la cuenca son los materiales más finos y, por lo tanto, son transportados únicamente en suspensión. A continuación, se muestra un esquema con la clasificación del transporte de sedimentos (Figura 4).

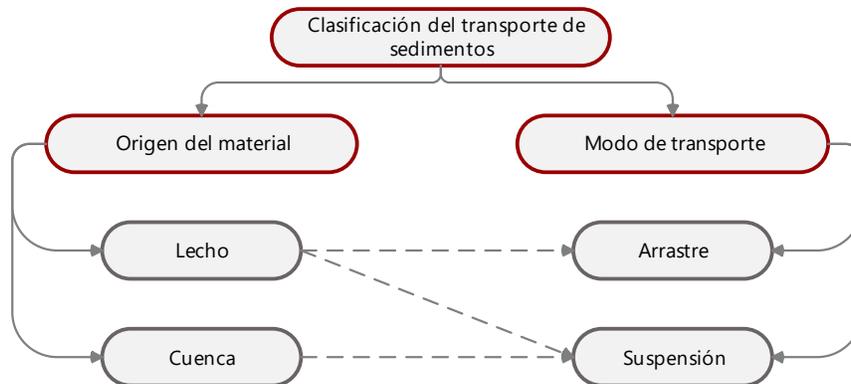


Figura 4. Clasificación del transporte de sedimentos.

2.2.2. Terminología del transporte de sedimentos

Esta terminología a veces puede ser confusa; por lo tanto, es importante definir algunos de los términos más utilizados y establecer la relación entre ellos (Bernard & Tuttle, 1998).

- **Carga de sedimentos o carga total de sedimentos (G_T):** cantidad de sedimento que pasa por cualquier sección transversal de un río en un periodo de tiempo determinado, normalmente un día o un año. *Caudal sólido* es la masa o el volumen de sedimentos que pasa por una sección transversal de un arroyo en una unidad de tiempo. Las unidades típicas para la carga de sedimentos son toneladas, mientras que las unidades de caudal sólido son toneladas por día.
- **Carga de lavado (G_L):** parte de la carga total de sedimentos compuesta por las partículas de sedimento que tienen tamaños más finos que los sedimentos encontrados en el lecho del cauce.
- **Carga de material del lecho (G_{BT}):** parte de la carga total de sedimentos compuesta por las partículas de sedimento que tienen el mismo tamaño que los sedimentos encontrados en el lecho del cauce.
- **Carga por arrastre (G_B):** parte de la carga total de sedimentos que se desplaza en el lecho del río o cerca de él por saltación, rodadura o deslizamiento en la capa de fondo.
- **Carga del material del lecho en suspensión (G_{BS}):** parte de la carga de material del lecho que se transporta en suspensión en la columna de agua. Esta carga y la carga por arrastre comprenden la carga total de material del lecho.
- **Carga en suspensión (G_S):** parte de la carga total de sedimentos que es transportada en suspensión por la turbulencia del flujo de agua.

En la Figura 5 se muestra la forma como se deben agrupar estos términos para obtener la carga total de sedimentos en un cauce:

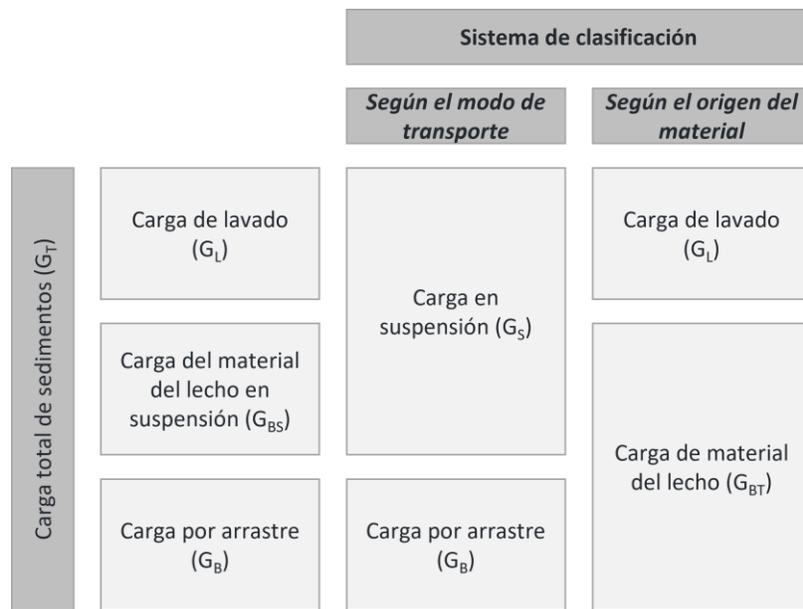


Figura 5. Carga total de sedimentos. Fuente: adaptado de (Bernard & Tuttle, 1998).

2.2.3. Potencia de la corriente

La potencia de la corriente se define como la energía disponible por unidad de área (Rodríguez Díaz, 2010):

$$P = \gamma y S_0 V$$

Ecuación 1. Potencia de la corriente

Donde:

P = potencia de la corriente [$N\cdot m/s$]

γ = peso específico del agua [N/m^3]

y = profundidad de la lámina de agua [m]

S_0 = pendiente media del fondo del lecho [m/m]

V = velocidad media de la corriente [m/s]

La capacidad de arrastre está directamente relacionada con la potencia de la corriente (V, S_0) (Bernard & Tuttle, 1998). La experiencia muestra que es posible estimar el transporte por arrastre en función de variables como el caudal, la velocidad o la pendiente media del lecho (Rodríguez Díaz, 2010).

2.2.4. Movimiento incipiente

Para estudiar el transporte de sedimentos es necesario analizar el comienzo del movimiento de las partículas o *movimiento incipiente*. Si se supone una partícula de sedimento de forma esférica sobre el fondo del lecho de un cauce aluvial, con una pendiente longitudinal muy pequeña, tal que se pueda despreciar la componente del peso en la dirección del movimiento, se presentan las siguientes fuerzas actuando sobre la partícula (Rodríguez Díaz, 2010):

F_L = fuerza ascensional, producida por las componentes verticales de la velocidad

F_D = fuerza de arrastre, producida por las componentes horizontales de la velocidad

W_S = peso sumergido de la partícula

F_R = fuerza de resistencia, producida entre la frontera fija y las partículas en movimiento

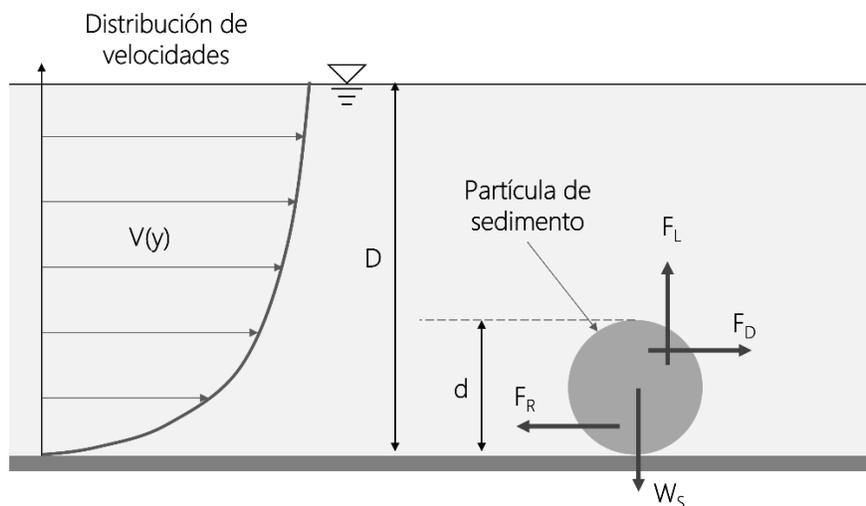


Figura 6. Análisis de fuerzas para el estudio del movimiento incipiente. Fuente: adaptado de Rodríguez Díaz, 2010.

Cuando la partícula se encuentra en estado de movimiento incipiente se cumplen algunas de estas condiciones (Rodríguez Díaz, 2010):

$$F_L = W_S$$

$$F_D = F_R$$

$$M_0 = M_R$$

Donde:

M_0 = momento del movimiento producido por F_D y F_R

M_R = momento resistente al movimiento debido a F_L y W_S

La determinación del movimiento incipiente de las partículas o la condición crítica de arrastre es de gran importancia en la ingeniería fluvial, debido a que permite inferir las condiciones que originarían el transporte de partículas del material del lecho o las condiciones que favorecerían su sedimentación (Villalobos, 1996). Los criterios más utilizados para determinar el movimiento incipiente toman como referencia los esfuerzos cortantes.

2.2.4.1. Aproximación de esfuerzos cortantes. Aproximación de Shields

El arrastre de materiales no cohesivos con granulometría uniforme se ha estudiado desde hace varios siglos (Villalobos, 1996), para esto se han efectuado muchos experimentos de laboratorio, entre los que destacan los resultados presentados por Shields (Rodríguez Díaz, 2010).

Shields realizó sus experimentos en un canal de laboratorio utilizando flujo turbulento completamente desarrollado y materiales con distintas densidades, pero con granulometría uniforme, partiendo siempre de la condición de fondo plano y considerando

como condición crítica de arrastre aquella en la que existe un movimiento generalizado de las partículas, pero su transporte o el caudal sólido es muy pequeño y el fondo permanece plano (Villalobos, 1996).

Los resultados de sus experimentos los presentó en el "Diagrama de Shields" (Figura 7), como función de dos parámetros adimensionales:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d}$$

Ecuación 2. Esfuerzo cortante adimensional

$$R_* = \frac{U_* d}{\nu}$$

Ecuación 3. Número de Reynolds de corte

Donde:

τ_* = esfuerzo cortante adimensional [*adimensional*]

R_* = número de Reynolds de corte [*adimensional*]

τ_0 = esfuerzo cortante en el lecho [N/m^2]

d = diámetro característico de las partículas [m]

γ_s = peso específico de las partículas [N/m^3]

γ = peso específico del agua [N/m^3]

ν = viscosidad cinemática del agua [m^2]

U_* = velocidad de corte [m/s]

La velocidad de corte se define como:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Ecuación 4. Velocidad de corte

$$\tau_0 = \gamma R S_0$$

Ecuación 5. Esfuerzo cortante en el lecho

Donde:

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

R = radio hidráulico [m]

S_0 = pendiente del fondo del canal [m/m]

Las fuerzas promotoras del movimiento están representadas como $\tau_0 d^2$ y explican la acción del agua sobre el fondo. Estas fuerzas son contrarrestadas por la resistencia de las partículas que conforman el lecho (particularmente con su peso sumergido), la cual se puede expresar como $(\gamma_s - \gamma) d^3$. El primer parámetro de Shields, τ_* , denominado esfuerzo cortante crítico adimensional, relaciona las fuerzas causantes del movimiento con las fuerzas que se oponen a dicho movimiento. Este parámetro corresponde a las ordenadas del diagrama de Shields. Si se expresa τ_0 en función de la velocidad de corte U_* , el parámetro presenta la misma estructura de un número de Froude (Rodríguez Díaz, 2010).

El segundo parámetro, graficado en las abscisas, se denomina número de Reynolds de corte, R_* . Este parámetro utiliza la velocidad de corte como la velocidad significativa, el diámetro característico de las partículas y la viscosidad cinemática (Rodríguez Díaz, 2010). Al relacionar estos dos parámetros, experimentalmente se estableció una curva que representa la condición crítica de arrastre o de movimiento incipiente, en donde $\tau_0 = \tau_c$. La zona por encima de esta curva corresponde a situaciones en las que las partículas del cauce son transportadas por el flujo (hay movimiento del material del lecho); por el contrario, en la zona debajo de la curva no existe movimiento (Villalobos, 1996).

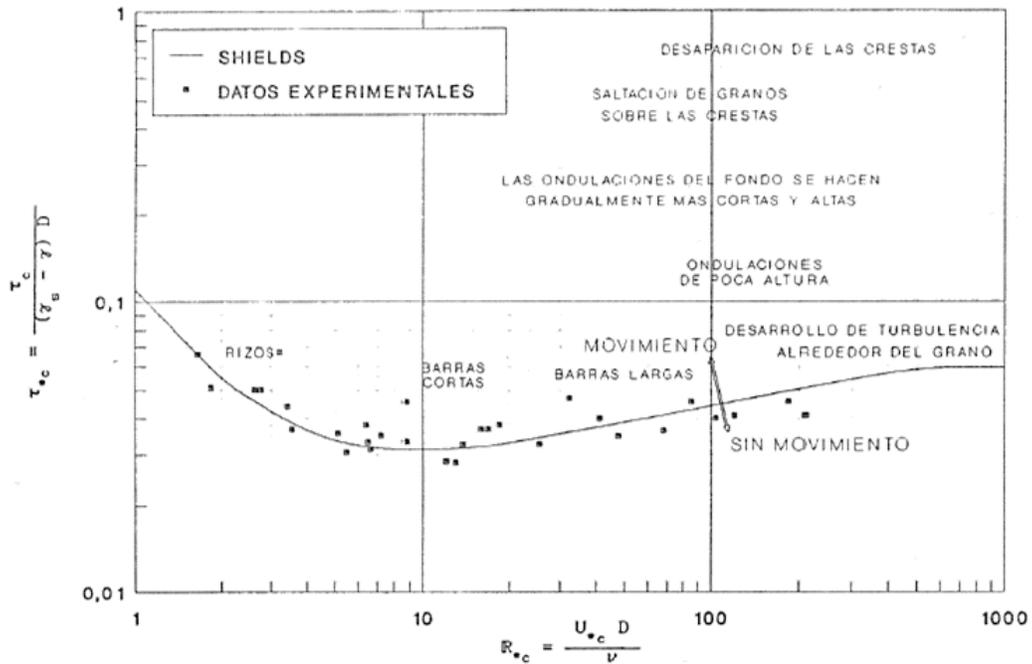


Figura 7. Diagrama de Shields. Fuente: Villalobos, 1996.

2.2.5. Predicción sobre la respuesta general de un río al cambio.

Analogía de la balanza de Lane

Los cauces de los ríos y sus llanuras de inundación se ajustan constantemente a la cantidad de agua y sedimentos suministrados por la cuenca. Los cambios diarios en el caudal y en la carga de sedimentos resultan en un ajuste frecuente de las formas del lecho y la rugosidad en muchos cauces con lechos móviles. Los cauces también se ajustan periódicamente a eventos extremos de caudales altos y bajos (Bernard & Tuttle, 1998).

Los cambios en el uso del suelo en la cuenca también pueden provocar niveles de ajuste similares. Del mismo modo, los cambios a largo plazo en la esorrentía o en la producción de sedimentos por causas naturales, como el cambio climático, incendios forestales, etc., o por causas humanas como el cultivo, el sobrepastoreo o las conversiones de zonas rurales a urbanas, pueden provocar ajustes a largo plazo de la sección transversal

y la forma de la planta del cauce, que a menudo se describen como *evolución del canal* (Bernard & Tuttle, 1998).

Por lo general, los datos disponibles no son suficientes para realizar predicciones cuantitativas de la respuesta de un río, por lo que sólo es posible analizar cualitativamente estos cambios (Rodríguez Díaz, 2010).

Una de las primeras relaciones propuestas para explicar el comportamiento de los cauces fue sugerida por Lane (1955), quien relacionó el caudal líquido (Q) y la pendiente del canal (S_0) con la carga de sedimentos del lecho (Q_s) y el tamaño medio de las partículas en el lecho del río (d_{50}) (Bernard & Tuttle, 1998).

$$Q_s d_{50} \approx Q S_0$$

Ecuación 6. Relación de Lane

La relación de Lane sugiere que un canal se mantendrá en equilibrio dinámico cuando los cambios en la carga de sedimentos y en el tamaño del material del lecho se equilibran por los cambios en el caudal líquido o en la pendiente del canal. Un cambio en una de estas variables provoca cambios en una o más de las otras variables, de manera que se restablece el equilibrio dinámico (Bernard & Tuttle, 1998).

Lane propuso la analogía de la balanza, en la que se representan las cuatro variables mencionadas. En un brazo de la balanza se encuentra el caudal líquido (Q) sobre el platillo y la magnitud de la pendiente del cauce (S_0) escalada en el brazo, y en el otro brazo de la balanza se encuentrase halla el caudal sólido (Q_s) sobre el platillo y la magnitud del tamaño de las partículas d_{50} escalada en el brazo (Rodríguez Díaz, 2010). En la Figura 8 se presenta un esquema de la balanza con las variables analizadas.

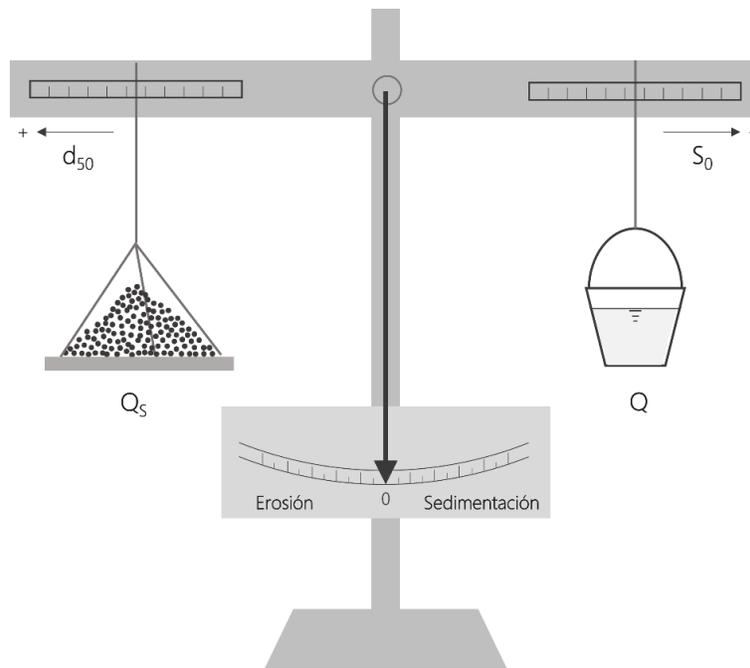


Figura 8. Analogía de la balanza de Lane. Fuente: elaboración propia.

Partiendo de la condición de equilibrio, si el caudal líquido aumenta o si se incrementa la pendiente del cauce, el fiel de la balanza se mueve a la izquierda, indicando erosión. En el caso contrario, si el caudal líquido disminuye o la pendiente se reduce, el fiel de la balanza se mueve a la derecha, indicando sedimentación (Rodríguez Díaz, 2010). Este mismo análisis puede realizarse con las demás variables.

2.2.6. Cuantificación del potencial de transporte de sedimentos

2.2.6.1. Carga de lavado y carga del material del lecho

La carga de sedimentos de un cauce se puede caracterizar en función del origen del material transportado. La carga total de sedimentos en un cauce, en cualquier momento y lugar, se divide en dos partes: la carga de lavado y la carga de lecho. La fuente principal de la carga de lavado es la cuenca hidrográfica, producto de procesos de erosión. La fuente de la carga de material del lecho es principalmente el propio lecho del río (Bernard & Tuttle, 1998).

La carga de lavado se compone de las partículas de sedimento más finas transportadas y la turbulencia del flujo las mantiene en suspensión. La concentración de la carga de lavado es esencialmente independiente de las condiciones hidráulicas de la corriente y, por lo tanto, no se puede calcular usando parámetros hidráulicos medidos o estimados (V o S_0). Esta concentración está generalmente en función de la disponibilidad de sedimentos, es decir, la corriente puede transportar tanto sedimento como la cuenca y las riberas puedan aportar (para concentraciones de sedimentos por debajo de aproximadamente 3000 mg/l) (Bernard & Tuttle, 1998).

La carga de material del lecho se mueve a lo largo del lecho del río rodando, deslizándose o en saltación, y puede ser arrastrada periódicamente al flujo por la turbulencia, convirtiéndose en una parte de la carga suspendida. La carga de material del lecho está controlada hidráulicamente y se puede calcular utilizando ecuaciones de transporte de sedimentos (Bernard & Tuttle, 1998).

2.2.6.2. *Potencial de transporte de sedimentos*

Es la máxima cantidad de sedimentos que se podrían transportar con base en las características hidráulicas dadas de una sección transversal (HEC RAS, 2016). Entonces, el potencial de transporte de sedimentos siempre será mayor o igual al transporte real de sedimentos debido a que no tiene en cuenta la cantidad de sedimentos disponibles para el transporte.

Las ecuaciones de transporte de sedimentos del material del lecho son algoritmos empíricos que determinan el potencial de transporte de sedimentos de una corriente, en función de sus características hidráulicas y de las características geométricas y granulométricas del cauce (Martín Vide, 1997). Sin embargo, cada ecuación fue desarrollada para condiciones particulares, lo cual se debe considerar al momento de escoger la ecuación que mejor se adapte a las características del sistema analizado.

En general, las ecuaciones de transporte de sedimentos se basan en aproximaciones de esfuerzos cortantes o de la potencia de la corriente (HEC RAS, 2016).

2.2.7. Ecuaciones de transporte de sedimentos

En este apartado se presentan algunas ecuaciones para estimar el potencial de transporte de sedimentos de carga por arrastre, carga en suspensión y carga total explicadas en “Sediment Transport: Theory and Practice” (Yang, 1996).

2.2.7.1. Ecuaciones de carga por arrastre

El transporte de sedimentos por arrastre presenta las siguientes características:

- El flujo satisface condiciones de movimiento incipiente.
- Movimiento de partículas rodando, deslizando o saltando.
- Del 5-25% de la carga en suspensión.
- Fórmulas clásicas de transporte desarrolladas a partir de las ecuaciones del transporte de fondo.

2.2.7.1.1. Aproximación de esfuerzos cortantes

Aproximación de DuBoys (1879)

- Movimiento de las partículas en capas.
- La fuerza tractiva actúa sobre el fondo.
- El espesor de cada capa es ϵ .
- En condiciones de equilibrio, la fuerza tractiva se puede balancear con la fuerza total de resistencia entre capas.

$$\tau = \gamma DS = C_f m \epsilon (\gamma_s - \gamma)$$

Ecuación 7. Condición de equilibrio entre el esfuerzo cortante y la fuerza de resistencia entre capas

Donde:

C_f = coeficiente de fricción

m = número total de capas

ε = espesor de cada capa

S = pendiente del canal

γ_s, γ = peso específico del sedimento y del agua, respectivamente

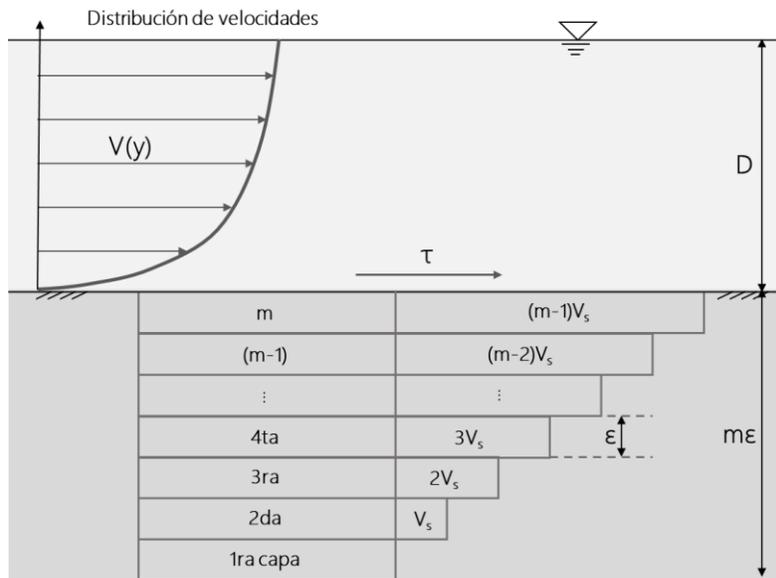


Figura 9. Esquema del modelo de carga de fondo de DuBoys. Fuente: adaptado de Yang, 1996.

Si la variación de la velocidad es lineal en las capas, el caudal total de carga por arrastre (en volumen) por unidad de ancho es:

$$q_b = \varepsilon V_s \frac{m(m-1)}{2}$$

Donde:

V_s = velocidad en la segunda capa

Para movimiento incipiente $m = 1$, entonces la Ecuación 7 se convierte en:

$$\tau_c = C_f \varepsilon (\gamma_s - \gamma) \text{ y } m = \frac{\tau}{\tau_c}$$

Donde:

τ_c = esfuerzo cortante crítico en el fondo

$$q_b = \frac{\varepsilon V_s}{2\tau_c^2} \tau(\tau - \tau_c) = K\tau(\tau - \tau_c)$$

Donde:

K = coeficiente relacionado con las características de las partículas

Straub (1935) planteó una ecuación para determinar K en función del diámetro de la partícula. E, el valor de K es en unidades del sistema inglés, pero con el valor del diámetro de la partícula d en mm:

$$K = \frac{0,173}{d^{3/4}} \left[\frac{ft^6}{(lb^2-s)} \right]$$

Entonces, la ecuación de DuBoys queda así:

$$q_b = \frac{0,173}{d^{3/4}} \tau(\tau - \tau_c) \left[\left(\frac{ft^3}{s} \right) / ft \right]$$

Ecuación 8. Ecuación de DuBoys para carga por arrastre.

- Las relaciones entre τ_c , K y d se pueden tomar de la Figura 10.
- τ_c se puede determinar del diagrama de Shields (Figura 7).

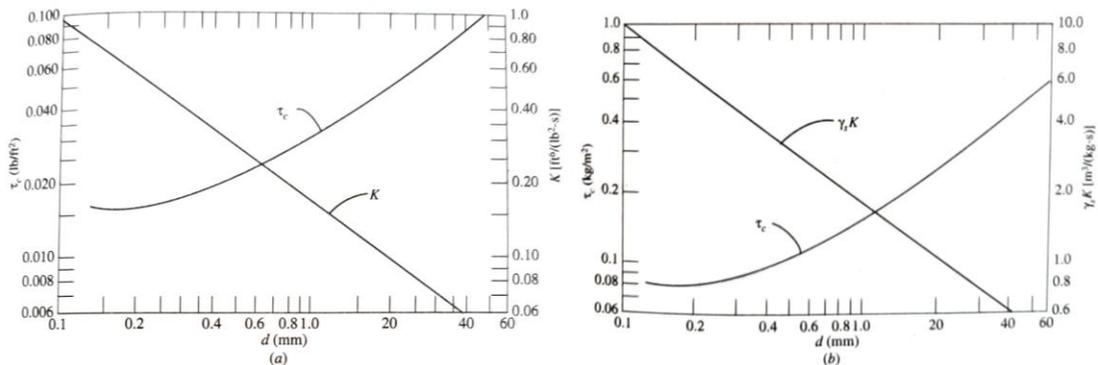


Figura 10. Parámetros de sedimento y esfuerzo cortante crítico para la ecuación de DuBoys: a) Sistema inglés, b) Sistema internacional. Fuente: Yang, 1996.

La ecuación de DuBoys presenta los siguientes inconvenientes:

- Todos los datos se obtuvieron en pequeños canales de laboratorio con un rango pequeño de variación del tamaño de las partículas.
- No es claro si K es aplicable a las condiciones de campo.

Aproximación de Shields (1936)

En sus estudios de movimiento incipiente midió condiciones de flujo con transporte de sedimentos superiores a cero. Obtuvo la siguiente ecuación semiempírica:

$$\frac{q_b \gamma_s}{q \gamma S} = 10 \frac{\tau - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d}$$

Ecuación 9. Ecuación de Shields para carga por arrastre.

Donde:

q_b, q = caudal de carga por arrastre y líquido por unidad de ancho de cauce, respectivamente.

$$\tau = \gamma DS.$$

d = diámetro de la partícula.

γ_s, γ = peso específico del sedimento y del agua, respectivamente.

Esta ecuación es dimensionalmente homogénea, se puede usar en cualquier sistema de unidades. El esfuerzo cortante crítico τ_c se puede obtener del diagrama de Shields (Figura 7).

Aproximación de Kalinske (1947)

En 1947 Kalinske asumió que:

$$u_s = b(u - V_c)$$

Donde:

u_s, u = velocidades instantáneas del sedimento y el fluido a la altura de la partícula

V_c = velocidad crítica del flujo para movimiento incipiente

b = constante cercana a 1

Para flujos turbulentos,

$$\frac{\bar{u}_s}{U_*} = f\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right)$$

Donde:

\bar{u}_s = valor medio de u_s

U_* = velocidad de corte

Por definición de movimiento de carga por arrastre:

$$q_b = \alpha P d \bar{u}_s$$

Donde:

q_b = caudal de carga por arrastre por unidad de ancho

P = fracción del fondo cubierta por partículas

d = tamaño medio de la partícula

α = factor de forma ($\frac{2}{3}$ para esferas uniformes)

Entonces,

$$\frac{q_b}{U_* d} = f'\left(\frac{\tau_c}{\tau}\right)$$

Ecuación 10. Ecuación de Kalinske para carga por arrastre.

La relación se muestra en la Figura 11.

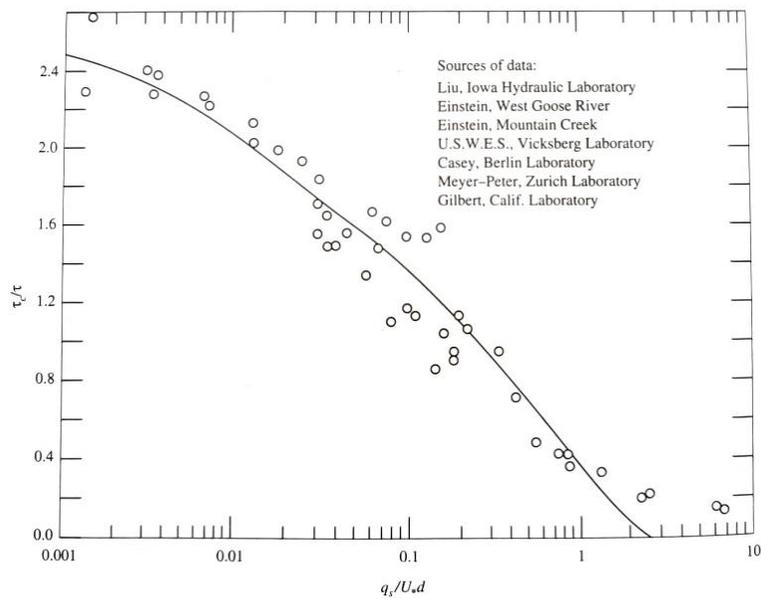


Figura 11. Ecuación de Kalinske de carga por arrastre. Fuente: Yang, 1996.

Chang, Simons y Richardson (1967)

Sugirieron que el caudal de carga por arrastre en peso se puede calcular como:

$$q_b = \frac{K_b \gamma_s V (\tau - \tau_c)}{(\gamma_s - \gamma) \tan \phi} = K_t V (\tau - \tau_c) \left[\left(\frac{lb}{s} \right) / ft \right]$$

Ecuación 11. Ecuación de Chang, Simons y Richardson para carga por arrastre.

Donde:

K_b = constante

ϕ = ángulo de reposo del material de fondo sumergido

Los valores de K_t se obtienen de la Figura 12.

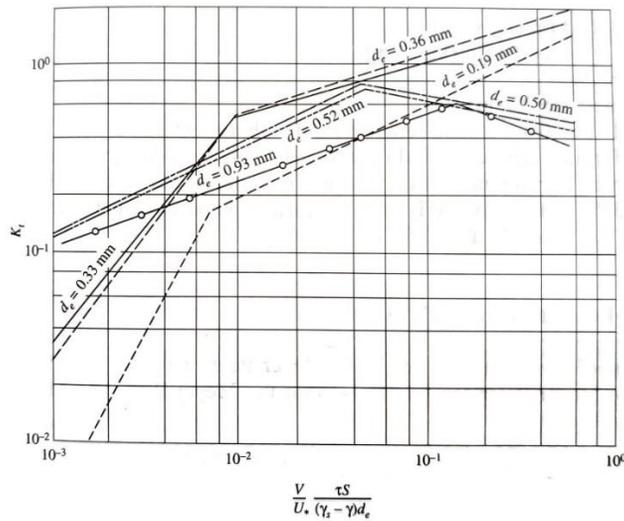


Figura 12. Valores de K_t para diferentes tamaños de arena. Fuente: Yang, 1996.

2.2.7.1.2. Aproximación de la pendiente de energía

Aproximación de Meyer-Peter (1934)

Presentan una fórmula utilizando unidades del sistema métrico, obtenido a partir de estudios de laboratorios.

$$\frac{0.4q_b^{2/3}}{d} = \frac{q^{2/3}S}{d} - 17$$

Ecuación 12. Ecuación de Meyer-Peter para carga por arrastre.

Donde:

q_b = carga por arrastre [(kg/s)/m]

q = caudal líquido [(kg/s)/m]

S = pendiente [m/m]

d = tamaño de la partícula [m]

Las constantes 0,4 y 17 son válidas solamente para arenas de gravedad específica de 2,65 y diámetro mayor a 3 mm. Para mezclas no uniformes d puede reemplazarse por d_{35} .

Aproximación de Meyer-Peter-Müller (1948)

$$\gamma \left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{\frac{3}{2}} RS = 0.047(\gamma_s - \gamma)d + 0.25\rho^{1/3}q_b^{2/3}$$

Ecuación 13. Ecuación de Meyer-Peter-Müller para carga por arrastre.

Donde:

γ_s, γ = peso específico del sedimento y del agua, respectivamente [ton/m^3].

R = radio hidráulico [m].

S = pendiente de energía.

d = diámetro de la partícula [m].

ρ = densidad del agua [ton/m^3].

q_b = carga por arrastre en porcentaje de peso sumergido por unidad de tiempo y ancho [$(ton/s)/m$].

$(K_s/K_r)S$ = clase de pendiente que se ajusta de tal manera que sólo una porción de las pérdidas de energía, debida a la resistencia al grano S_r , es responsable del movimiento.

Adimensionalmente, esta ecuación se puede expresar como:

$$\left[\frac{q_s(\gamma_s - \gamma)}{\gamma_s} \right]^{2/3} \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/3} \frac{0.25}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{\left(\frac{K_s}{K_r} \right)^{3/2} \gamma RS}{(\gamma_s - \gamma)d} - 0.047$$

Ecuación 14. Ecuación adimensional de Meyer-Peter-Müller para carga por arrastre.

La pendiente de energía se obtiene de la fórmula de Strickler.

$$S = \frac{V^2}{K_s^2 R^{4/3}}$$

Ecuación 15. Fórmula de Strickler.

Si la pendiente de energía debida a la resistencia del grano también se calcula de la fórmula de Strickler,

$$S_r = \frac{V^2}{K_r^2 R^{4/3}}$$

Entonces,

$$\frac{K_s}{K_r} = \left(\frac{S_r}{S}\right)^{1/2}$$

Pero los resultados experimentales muestran que:

$$\left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} = \frac{S_r}{S}$$

El coeficiente K_r Müller lo determinó como:

$$K_r = \frac{26}{d_{90}^{1/6}}$$

2.2.7.1.3. Aproximación de descarga

Schoklitsch

1934 – Sistema métrico

$$q_b = 7000 \frac{S^{3/2}}{d^{1/2}} (q - q_c)$$

Ecuación 16. Ecuación de Schoklitsch para carga por arrastre (1934).

Donde:

q_b = carga por arrastre [(kg/s)/m].

d = diámetro de la partícula [mm].

q, q_c = caudal líquido y caudal crítico para movimiento incipiente, respectivamente [(m³/s)/m].

Para sedimentos con gravedad específica de 2,65, el caudal crítico se calcula como:

$$q_c = \frac{0.00001944d}{S^{4/3}}$$

Ecuación 17. Caudal crítico para movimiento incipiente (1934).

1943 – Sistema métrico

$$q_b = 2500S^{3/2}(q - q_c)$$

Ecuación 18. Ecuación de Schoklitsch para carga por arrastre (1943).

Para sedimentos con gravedad específica de 2,65, el caudal crítico en la Ecuación 18 se calcula como:

$$q_c = \frac{0.6d^{3/2}}{S^{7/6}}$$

Ecuación 19. Caudal crítico para movimiento incipiente (1943).

Donde:

d = diámetro de la partícula [m]

2.2.7.1.4. Aproximación de velocidad

La fórmula de DuBoys se puede reescribir como:

$$q_b = K(\gamma SD)(\gamma SD - \gamma SD_c) = K(\gamma S)^2(D)(D - D_c)$$

Donde:

D, D_c = profundidad normal y crítica en el movimiento incipiente, respectivamente

Donate (1929) supuso que la ecuación de Chèzy puede usarse y que los valores de C son iguales para D y D_c . Entonces:

$$q_b = \frac{K}{C^4} \gamma^2 V^2 (V^2 - V_c^2)$$

Ecuación 20. Ecuación de DuBoys adaptada por Donate para carga por arrastre.

Donde:

C = coeficiente de rugosidad de Chèzy.

γ = peso específico del agua.

V, V_c = velocidad media y velocidad media crítica para movimiento incipiente, respectivamente.

El valor de K se obtiene mediante la Figura 10.

2.2.7.1.5. Aproximación de formas de fondo

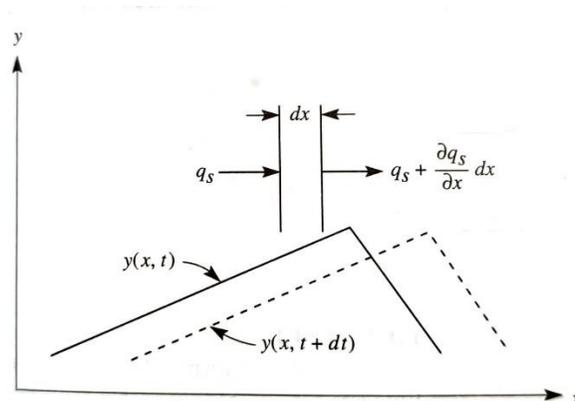


Figura 13. Forma de fondo moviéndose hacia aguas abajo. Fuente: Yang, 1996.

La ecuación de continuidad de la onda de arena que se muestra en la Figura 13 es:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(1-p)} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0$$

Donde:

p = porosidad del lecho

Si $\delta = x - V_s t$, siendo V_s la velocidad de la onda de arena, entonces:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial t} = -V_s \frac{\partial y}{\partial \delta}$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial x} = \frac{\partial q_b}{\partial \delta} \frac{\partial \delta}{\partial x} = \frac{\partial q_b}{\partial \delta}$$

Remplazando:

$$-V_s \frac{\partial y}{\partial \delta} + \frac{1}{(1-p)} \frac{\partial q_b}{\partial \delta} = 0$$

Integrando la ecuación anterior:

$$q_b = (1-p)V_s Y_v = (1-p)V_s \frac{A}{2}$$

Ecuación 21. Ecuación de carga por arrastre a partir de la aproximación de la forma de fondo.

Donde:

Y_v = volumen de sedimento movido por unidad de ancho = $\frac{A}{2}$

A = amplitud media de la onda triangular de arena

La Ecuación 21 se puede utilizar si se mide el tamaño de la forma de fondo.

2.2.7.1.6. Aproximaciones probabilísticas

Einstein (1942,1950)

Einstein tuvo dos ideas que rompieron los conceptos que se usaban en esa época:

1. Se evitó el criterio crítico de movimiento incipiente, ya que era difícil de definir.
2. El transporte por arrastre está relacionado con las fluctuaciones del flujo turbulento y no tanto con las fuerzas.

Por lo tanto, el inicio del movimiento se expresa en términos probabilísticos. Con base en sus experimentos encontró lo siguiente:

1. Existe un permanente e intenso cambio de partículas entre el material del lecho y el material por arrastre.
2. El movimiento de la carga por arrastre se desarrolla en una serie de etapas, cuyo promedio es 100 veces el diámetro de las partículas.
3. La tasa de deposición por unidad de área de fondo depende de la tasa de transporte que pase por la sección, como también de la probabilidad de que las fuerzas hidrodinámicas permitan el depósito de partículas. La tasa de erosión depende del número y propiedades de las partículas por unidad de área y de la probabilidad de que las fuerzas hidrodinámicas puedan moverlas. Para una condición de lecho estable, la tasa de erosión debe ser igual a la tasa de deposición.

El número de partículas de tamaño d que se depositan por unidad de área y tiempo es:

$$N_d = \frac{q_{bw} i_{BW}}{(A_L d)(\gamma_s A_2 d^3)}$$

Donde:

q_{bw} = carga por arrastre en peso por unidad de ancho de canal

i_{BW} = porcentaje de la carga por arrastre por peso del diámetro d

$A_L d$ = longitud media de un paso

$\gamma_s A_2 d^3$ = peso de las partículas de sedimento

El número de partículas erosionadas por unidad de tiempo y por unidad de área es:

$$N_e = \frac{i_{bw} p}{A_1 d^2 t_1}$$

Donde:

i_{bw} = número de partículas disponibles en el fondo

$A_1 d^2 =$ unidad de área del fondo

$p =$ probabilidad de que una cierta partícula sea erosionada

$t_1 =$ tiempo de cambio entre fondo y carga por arrastre

En condiciones de equilibrio $N_d = N_e$, Einstein definió una función de transporte como:

$$\phi = \frac{q_{bw}}{\gamma_s} \left[\frac{\gamma}{g(\gamma_s - \gamma)d^3} \right]^{1/2}$$

$$A_L d = \sum_{n=0}^{\infty} (1-p)p^n (n+1) \lambda d = \frac{\lambda d}{1-p}$$

$$\frac{p}{1-p} = \frac{A_1 A_3 i_{BW} q_{bw}}{A_2 \lambda i_{bw} \rho_s g} \left[\frac{\rho}{(\rho_s - \rho) g d^3} \right]^{1/2} = A_* \phi_*$$

El peso sumergido de las partículas de sedimentos es:

$$W' = g(\rho_s - \rho) A_2 d^3$$

La fuerza ascensional es:

$$L = C_L A_1 d^2 \frac{\rho u^2}{2}$$

Donde:

$u =$ velocidad local

$C_L =$ coeficiente ascensional (=0.178 experimental)

La distribución de velocidades es:

$$\frac{u}{U_*} = 5.75 \log \left(30.2 \frac{y}{\Delta} \right)$$

Donde:

$U'_* =$ velocidad de corte debida a la rugosidad del grano $= (gR'S)^{1/2}$.

$R' =$ radio hidráulico asociado con la rugosidad del grano.

$\Delta = \frac{k_s}{x} =$ rugosidad aparente de la superficie del lecho.

$k_s = d_{65}$.

$x =$ factor de corrección obtenido de la Figura 14 con $\delta = 11.6 \frac{\nu}{U'_*}$, siendo ν la viscosidad cinemática.

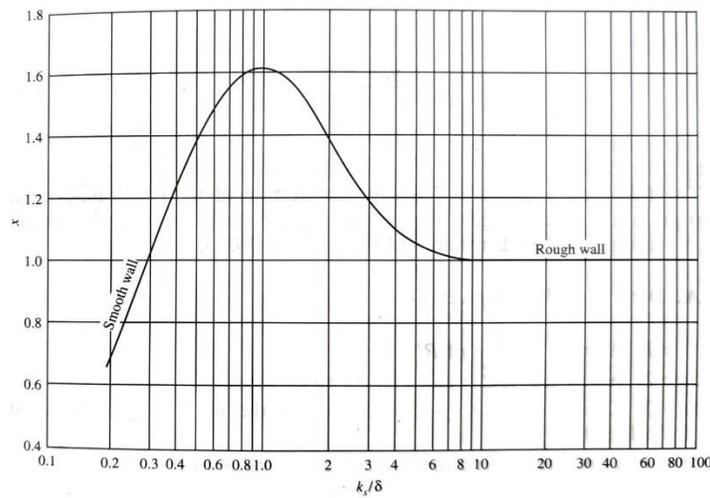


Figura 14. Factor de corrección en la distribución logarítmica de velocidades. Fuente: Yang, 1996.

De los experimentos realizados:

$$y = 0.35X$$

$X =$ tamaño característico del grano de la mezcla

Entonces,

$$u^2 = R'Sg(5.75)^2 \left(\log \left(10.6 \frac{X}{\Delta} \right) \right)^2$$

y

$$L = 0.178A_1 d^2 \frac{\rho}{2} R' S g (5.75)^2 \left(\log \left(10.6 \frac{X}{\Delta} \right) \right)^2 (1 + \eta)$$

Donde:

η = parámetro para describir la fluctuación de la velocidad con respecto al tiempo

Por otra parte, el valor de p se puede interpretar como la probabilidad de que $\frac{W'}{L}$ sea menor que 1, por lo tanto:

$$\begin{aligned} 1 &> \frac{W'}{L} \\ &= \frac{1}{1 + \eta} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{R' S} \left[\frac{2A_2}{0.178A_1 5.75^2} \right] \left[\frac{1}{\log \left(10.6 \frac{X}{\Delta} \right)} \right]^2 \\ &= \frac{1}{1 + \eta} \frac{\psi B}{\beta_x^2} \end{aligned}$$

Donde:

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{R' S}$$

$$\beta_x = \log \left(10.6 \frac{X}{\Delta} \right)$$

$$B = \frac{2A_2}{0.178A_1 5.75^2}$$

El valor de η puede ser positivo o negativo, pero la fuerza ascensional siempre es positiva, entonces, la ecuación se puede reescribir como:

$$|(1 + \eta)| > \frac{\psi B}{\beta_x^2}$$

Einstein (1950) sugirió dos factor de corrección y reescribió la ecuación anterior como:

$$|(1 + \eta)| > \xi Y B' \psi \frac{\beta^2}{\beta_x^2}$$

Donde:

ξ = factor de corrección de encubrimiento

Y = factor de corrección de levantamiento

$$B' = \frac{B}{\beta^2}$$

$$\beta = \log 10.6$$

Los valores de ψ y Y se obtienen de la Figura 15.

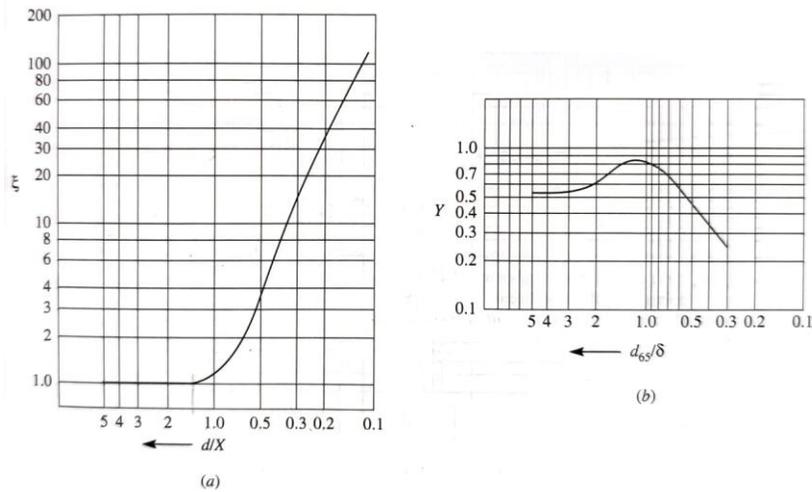


Figura 15. Factores de corrección de la ecuación de Einstein de transporte por arrastre. Fuente: Yang, 1996.

De la Figura 15 (a):

$$X = 0.77 \frac{\delta_{65}}{x} \text{ cuando } \frac{d_{65}}{x\delta} > 1.8$$

$$X = 1.398\delta \text{ cuando } \frac{d_{65}}{x\delta} < 1.8$$

Procedimiento de cálculo

- Para un material de fondo y unas condiciones de flujo dadas se calcula $\psi_* = \xi Y \left(\frac{\beta^2}{\beta_x^2} \right) \psi$, ξ y Y se determinan gráficamente con la Figura 15 con el valor de x obtenido de la Figura 14. Los otros parámetros que se deben calcular son $\beta = \log 10.6$, $\beta_x = \log \left(10.6 \frac{X}{\Delta} \right)$, $\Delta = \frac{k_s}{x}$, $\psi = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{d}{R'S}$.
- Determinar ϕ_* . Conocido ψ_* se determina ϕ_* con la Figura 16.

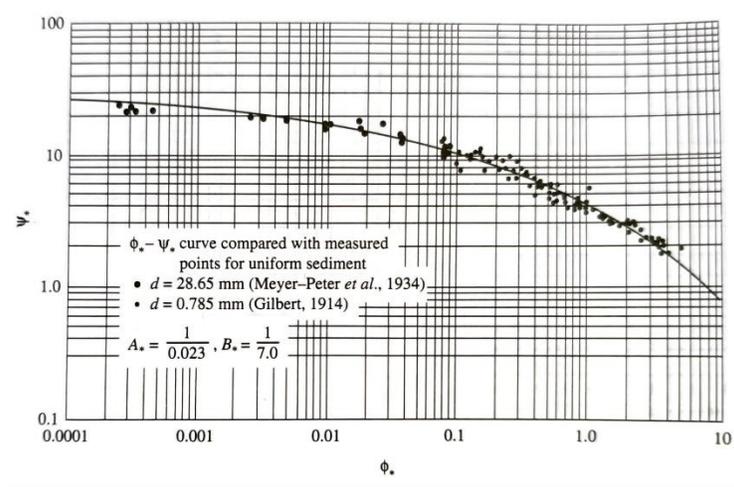


Figura 16. Relación entre ψ_* y ϕ_* de la ecuación de Einstein de transporte por arrastre. Fuente: Yang, 1996.

La carga por arrastre en peso y por unidad de ancho de un tamaño dado $i_{BW}q_{bw}$, se puede calcular así:

$$\phi_* = \frac{i_{BW}q_{bw}}{i_{bw}\rho_s g} \left[\frac{\rho}{(\rho_s - \rho)gd^3} \right]^{1/2}$$

Ecuación 22. Ecuación de Einstein para la obtención de carga por arrastre en peso y por unidad de ancho de un tamaño dado.

Donde:

q_{bw} = carga por arrastre en peso por unidad de ancho de canal

d = diámetro de la partícula

i_{BW} = porcentaje de la carga por arrastre por peso del diámetro d

i_{bw} = número de partículas disponibles en el fondo

ρ_s, ρ = densidad del sedimento y del agua, respectivamente

g = aceleración de la gravedad

- La carga total por arrastre se puede obtener siguiendo el procedimiento para cada tamaño de partícula y sumando el resultado correspondiente al rango de tamaños del material del lecho.
- Para granulometrías con poca diferencia de tamaños de partícula, la carga total por arrastre se puede determinar usando como diámetro efectivo el d_{35} .

2.2.7.2. Ecuaciones de carga en suspensión

Carga en suspensión se refiere al sedimento transportado por las componentes ascensionales de las corrientes turbulentas y se mantiene en suspensión por un periodo de tiempo considerable.

$$q_{sv} = \int_a^D \bar{u}\bar{c}dy \text{ o } q_{sw} = \gamma_s \int_a^D \bar{u}\bar{c}dy$$

Donde:

q_{sv} y q_{ws} = carga de sedimentos en términos de volumen y peso, respectivamente

\bar{u} y \bar{c} = velocidad y concentración del sedimento promedio

a = espesor del transporte por arrastre

D = profundidad de la lámina de agua

γ_s = peso específico del sedimento

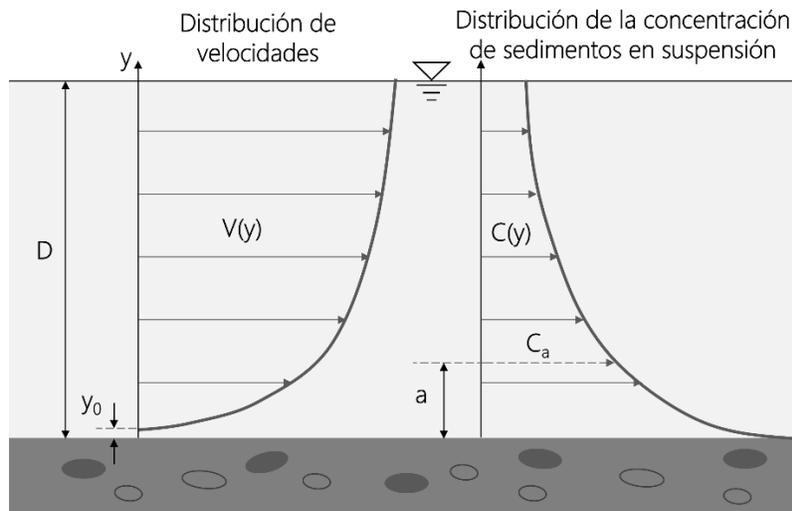


Figura 17. Distribución de velocidades y de la concentración de sedimentos en suspensión. Fuente: adaptado de Rodríguez Díaz, 2010.

2.2.7.2.1. Teoría de intercambio bajo condiciones de equilibrio

Ecuación de Rouse

En condiciones de equilibrio, el movimiento debido a la velocidad de caída se balancea por el movimiento neto ascensional del sedimento, como consecuencia de las fluctuaciones turbulentas.

$$\omega C + \varepsilon_s \frac{dC}{dy} = 0$$

Donde:

ε_s = coeficiente de difusión de cantidad de movimiento, que es función de y

ω = velocidad de caída de las partículas

C = concentración de sedimentos

Para flujos turbulentos, los esfuerzos cortantes se pueden expresar como:

$$\tau_y = \varepsilon_m \rho \frac{du}{dy}$$

Donde:

ε_m = viscosidad cinemática eddy

ρ = densidad del fluido

Generalmente, se asume que $\varepsilon_s = \beta \varepsilon_m$, siendo β un factor de proporcionalidad, que para sedimentos finos en suspensión se puede asumir igual a 1.

$$\frac{dC}{C} + \omega \frac{dy}{\varepsilon_s} = 0$$

Integrando:

$$C = C_a e^{-\left(\omega \int_a^y \frac{dy}{\varepsilon_s}\right)}$$

Donde C y C_a corresponden a la concentración de sedimentos por peso a las distancias y y a sobre el fondo, respectivamente.

El esfuerzo cortante a una distancia y del fondo es:

$$\tau_y = \gamma S(D - y) = \tau \left(1 - \frac{y}{D}\right)$$

Donde:

τ y τ_y = esfuerzo cortante en el fondo del canal y a una distancia y sobre el lecho, respectivamente

S = pendiente del canal

Asumiendo que la distribución de velocidades de Prandtl-von Kármán es válida:

$$\frac{du}{dy} = \frac{U_*}{ky}$$

Donde:

u = velocidad a una distancia y del fondo

U_* = velocidad de corte

k = constante universal de Prandtl-von Kármán (=0.4 para agua clara)

Entonces,

$$\varepsilon_m = k U_* \frac{y}{D} (D - y) \text{ y } \varepsilon_s = \beta k U_* \frac{y}{D} (D - y)$$

En $y = 0$ y $y = D$, $\varepsilon_m = 0$. El valor máximo de ε_m ocurre cuando $y = \frac{D}{2}$.

Finalmente:

$$\int_a^y \frac{dc}{C} = - \int_a^y \frac{\omega dy}{\beta k U_* \left(\frac{y}{D}\right) (D - y)}$$

Si $z = \frac{\omega}{k U_*}$ y $\beta = 1$:

$$\ln \frac{C}{C_a} = 1 - \int_a^y \frac{zD}{y(D - y)} dy = \ln \left(\frac{D - y}{y} \frac{a}{D - a} \right)^z$$

O

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D - y}{y} \frac{a}{D - a} \right)^z$$

Ecuación 23. Ecuación de Rouse.

2.2.7.2.2. Efecto de los sedimentos suspendidos sobre z , k y la distribución de velocidad

Para partículas gruesas $\beta < 1$; por lo tanto, la ecuación de Rouse se puede reescribir como:

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{D - y}{y} \frac{a}{D - a} \right)^{z_1}$$

Donde $z_1 = \frac{z}{\beta}$. Chien (1954) desarrolló gráficamente la relación entre z y z_1 . La ecuación resultante de esta relación es:

$$z_1 = \frac{z}{e^{-\frac{L^2 z^2}{\pi}} + \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} Lz \int_0^{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} Lz} e^{-\frac{x^2}{2}} dx}$$

Ecuación 24. Relación entre z y z_1 , desarrollada por Chien.

Donde:

$$x = \ln y$$

$L = 1 + Rk$, la curva con mejor ajuste es para $Rk = 0.3$

2.2.7.2.3. Aproximaciones para el cálculo de la carga en suspensión

Aproximación de Lane y Kalinske

Lane y Kalinske asumieron que $\varepsilon_s = \varepsilon_m$ y $\beta = 1$, por lo que:

$$\varepsilon_s = \beta U_* \frac{y}{D} (D - y)$$

El valor medio de ε_s en la vertical es:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\int_0^D \varepsilon_s dy}{D} = \frac{kU_*}{D^2} \int_0^D (yD - D^2) dy$$

Si $k = 0.4$, entonces:

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{U_* D}{15}$$

Se obtiene:

$$C = C_a e^{\left[-\frac{15\omega}{U_*} \left(\frac{y-a}{D}\right)\right]}$$

Donde:

ω = velocidad de caída correspondiente al d_{50}

Integrando a través de la profundidad del flujo para obtener una concentración media de la suspensión, se define:

$$P_L = \frac{\bar{C}}{C_a}$$
$$q_{sw} = q C_a P_L e^{\left(\frac{15\omega a}{U_* D}\right)}$$

Ecuación 25. Ecuación de carga por suspensión de Lane y Kalinske.

Donde:

P_L se determina gráficamente a partir de la velocidad de caída relativa $\frac{\omega}{U_*}$, en unidades del sistema imperial, utilizando la Figura 18.

C_a = concentración en peso seco, si se expresa en porcentaje se debe multiplicar por el peso específico del agua.

q_{sw} = carga de sedimentos en peso por unidad de ancho.

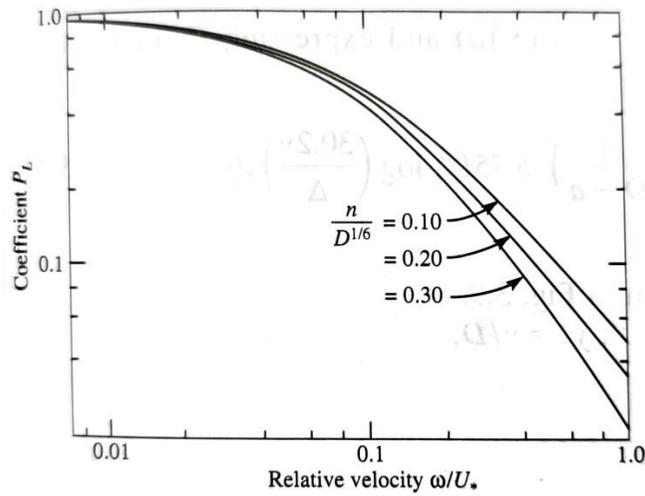


Figura 18. Relación entre P_L y $\frac{\omega}{U_*}$. Fuente: Yang, 1996.

Aproximación de Einstein

Supuso que $\beta = 1$ y $k = 0.4$. Reemplazó U_* por U'_* , la velocidad de corte debido a la rugosidad del grano. Entonces:

$$Z_1 = Z = \frac{\omega}{0.4U'_*}$$

La velocidad puede expresarse como:

$$\frac{u}{U'_*} = 5.75 \log \left(30.2 \frac{y}{\Delta} \right)$$

Entonces:

$$q_{sw} = \int_a^D C_a \left(\frac{D-y}{y} \frac{a}{D-a} \right)^z 5.75 U'_* \log \left(30.2 \frac{y}{\Delta} \right) dy$$

$$q_{sw} = 11.6 U'_* C_a a \left[\left(2.303 \log \frac{30.2D}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right]$$

Ecuación 26. Ecuación de carga por suspensión de Einstein.

Donde:

q_{sw} = carga de sedimentos en peso por unidad de ancho

$$C_a = \frac{1}{16} \frac{i_{BW} q_{bw}}{a U_*'} = \text{concentración en peso seco para } y = a$$

$i_{BW} q_{bw}$ = tasa de transporte por arrastre por peso de tamaño i_{BW}

I_1 y I_2 = obtenidos gráficamente a partir de la Figura 19

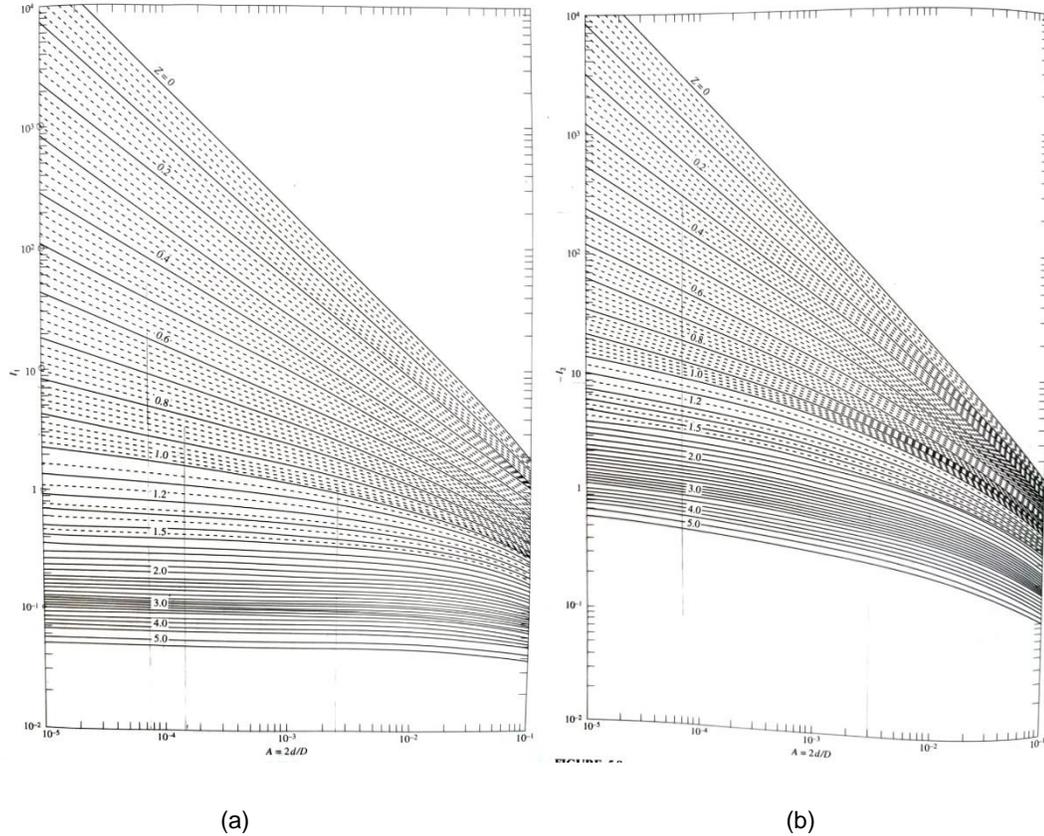


Figura 19. Funciones de I_1 y I_2 de la ecuación de Einstein de carga en suspensión. Fuente: Yang, 1996.

Aproximación de Brooks

Brooks (1963) asumió que se puede aplicar la distribución logarítmica de velocidades y la concentración de sedimentos en la vertical, lo cual permite obtener una relación similar a la de Einstein:

$$q_{sw} = C_{md} q \left[1 + \frac{U_*}{kV} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^{Z_1} dy + \frac{U_*}{kV} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^{Z_1} \ln y dy \right]$$

Donde:

q = caudal líquido por unidad de ancho

C_{md} = concentración de sedimentos a $y = \frac{D}{2}$

Esta ecuación se puede expresar en términos de una función de transporte T_B :

$$\frac{q_{sw}}{C_{md}q} = T_B \left(k \frac{V}{U_*}, Z_1 \right)$$

Ecuación 27. Función de transporte de carga por suspensión de Brooks.

La aplicación de esta relación se muestra en la Figura 20.

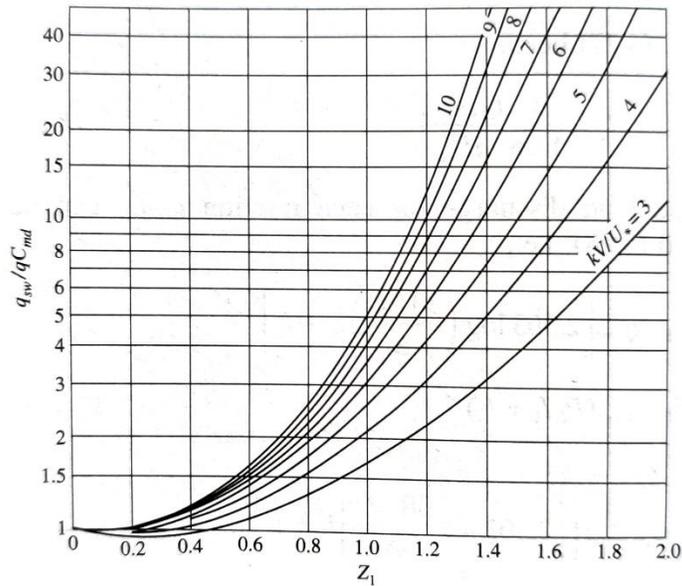


Figura 20. Función de transporte de carga en suspensión de Brooks. Fuente: Yang, 1996.

Aproximación de Chang, Simons y Richardson (1965)

Asumieron que ε_s es válida y la reescribieron como:

$$\varepsilon_s = \beta k D \xi U_* (1 - \xi)^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$$\xi = \frac{y}{D}$$

$$U_* = (gDS)^{\frac{1}{2}}$$

Sustituyendo en la ecuación de Rouse:

$$\frac{C}{C_a} = A_1 \left[\frac{\xi_a^{\frac{1}{2}}}{1 - (1 - \xi_a)^{\frac{1}{2}}} \right]^{Z_2}$$

Entonces, la expresión para la carga en suspensión queda así:

$$q_{sw} = \int_a^D C u dy = DC_a \left(VI_1 - \frac{2U_*}{k} I_2 \right)$$

La tasa de transporte q_{sw} se mide en peso por unidad de volumen de mezcla agua-sedimentos. Si q_{sw} se expresa en peso por segundo por unidad de ancho de canal y C_a es concentración por peso, entonces:

$$q_{sw} = \gamma DC_a \left(VI_1 - \frac{2U_*}{k} I_2 \right)$$

$$q_{sw} = R_S q_{bw}$$

Ecuación 28. Ecuación de carga en suspensión de Chang, Simons y Richardson.

Si se asume que la velocidad del sedimento de fondo $u_B = 0.8V$:

$$R_S = \frac{D}{0.8aV} \left(VI_1 - \frac{2U_*}{k} I_2 \right)$$

y a es el espesor de la capa de transporte por arrastre,

$$a = j \frac{\tau - \tau_c}{(1 - \lambda)(\gamma_s - \gamma) \tan \phi}$$

Donde:

j = constante experimental (=10)

λ = porosidad del material del lecho

ϕ = ángulo de reposo del material sumergido

Los valores de I_1 y I_2 se obtienen gráficamente.

2.2.7.3. Ecuaciones de carga total

Con base en el modo de transporte, la carga total corresponde a la suma de la carga por arrastre y la carga en suspensión. Si es en el origen del material transportado, la carga total también se puede definir como la suma de la carga del material del lecho y la carga de lavado. No obstante, es difícil predecir la carga de lavado con base en las características hidráulicas del río, ya que depende principalmente de la disponibilidad de material de la cuenca. Entonces, la mayoría de las ecuaciones de carga total realmente son ecuaciones de carga total del material del lecho (Yang, 1996).

Existen dos aproximaciones generales para determinar la carga total:

- Calcular primero la carga por arrastre y la carga en suspensión por separado, y luego sumarlas.
- Calcular la carga total sin hacer distinción entre la carga por arrastre y la carga en suspensión.

2.2.7.3.1. Aproximaciones probabilísticas

Aproximación original de Einstein (1950)

Según la ecuación de Einstein, la carga por arrastre es:

$$i_{BW}q_{bw} = \phi_* i_{bw} \rho_s g \left[\frac{\rho}{(\rho_s - \rho)gd^3} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

La carga en suspensión por unidad de ancho de una fracción de un tamaño dado es:

$$i_{sw}q_{sw} = i_{BW}q_{bw}(P_E I_1 + I_2)$$

Entonces, la carga total de una fracción de tamaño i_t sería:

$$i_t q_t = i_{BW} q_{bw} + i_{sw} q_{sw}$$

$$i_t q_t = i_{BW} q_{bw} (1 + P_E I_1 + I_2)$$

Ecuación 29. Ecuación de carga total de Einstein.

Aproximación de Toffaleti (1969)

Procedimiento de cálculo con base en Einstein (1950) y Einstein-Chien (1953), con las siguientes simplificaciones:

- Un canal ancho con descarga de sedimentos es igual a un canal rectangular de ancho B y profundidad R, siendo R el radio hidráulico del canal.
- La profundidad total del flujo se divide en cuatro zonas. Con base en esta consideración se calcula la carga total.

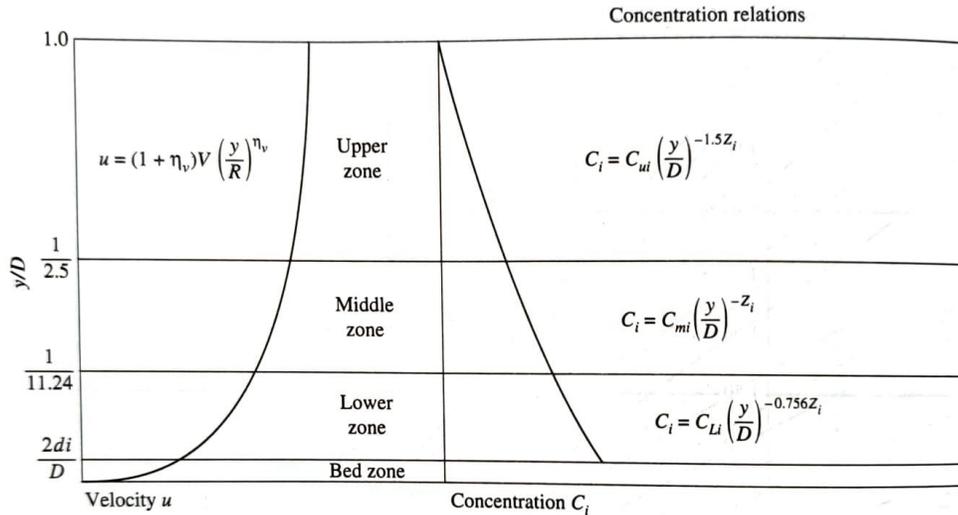


Figura 21. Relaciones de Toffaleti de la velocidad, la concentración y la carga de sedimentos. Fuente: Yang, 1996.

De esta manera, la carga total del material del lecho para un sedimento de tamaño d_i está dada por:

$$Q_{ti} = B(q_{Bi} + q_{sui} + q_{smi} + q_{sLi})$$

2.3. Medida del transporte de sedimentos. Normas y guías

2.3.1. Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua (IDEAM)

El “Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua” es un documento técnico publicado por el IDEAM en el año 2007, cuyo objetivo es suministrar “la información correspondiente a las prácticas y procedimientos necesarios para realizar mediciones confiables y oportunas de las variables hidrológicas: nivel, caudal y transporte de sedimento” (IDEAM, 2007).

2.3.1.1. *Aforo sólido del material en suspensión*

Para realizar un aforo sólido del material en suspensión es necesario conocer previamente el caudal líquido, debido a que este dato se utiliza para el cálculo del transporte de sedimentos. Por esta razón, el aforo de caudal líquido y sólido debe realizarse en la misma sección transversal (IDEAM, 2007).

Existen dos métodos de aforo sólido:

- **Método puntual:** se toman muestras en diferentes puntos de la vertical. Este método se utiliza en secciones en donde la altura de la lámina de agua es mayor a 5 m.
- **Método integrado:** consiste en que el muestreador recorre la vertical desde la superficie hasta el fondo y luego nuevamente hasta la superficie, se toma una sola muestra que se considera representativa para toda la vertical. Este método se utiliza en secciones con profundidades menores a 5 m.

En la Figura 22 se muestran los nombres de los muestreadores utilizados para cada método de aforo sólido mencionado.

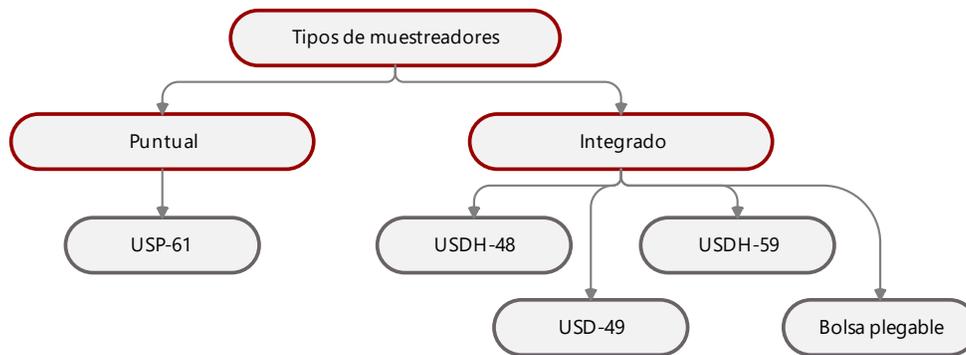


Figura 22. Tipos de muestreadores de material en suspensión. Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Minambiente)

El documento “Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico”, publicado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, presenta “una recomendación general de los contenidos mínimos que debe tener el análisis de sedimentos a escala de cuenca, los cuales deben adaptarse a las particularidades de cada caso de estudio, para lo cual se deberán complementar, según se requiera, las necesidades de información, los requisitos de modelación y las mediciones necesarias para caracterizar el régimen de sedimentos”.

En la Figura 23 se presenta un esquema resumen de la propuesta metodológica para el manejo de sedimentos. Un componente de la caracterización del sistema fluvial corresponde a la modelación del transporte de sedimentos.

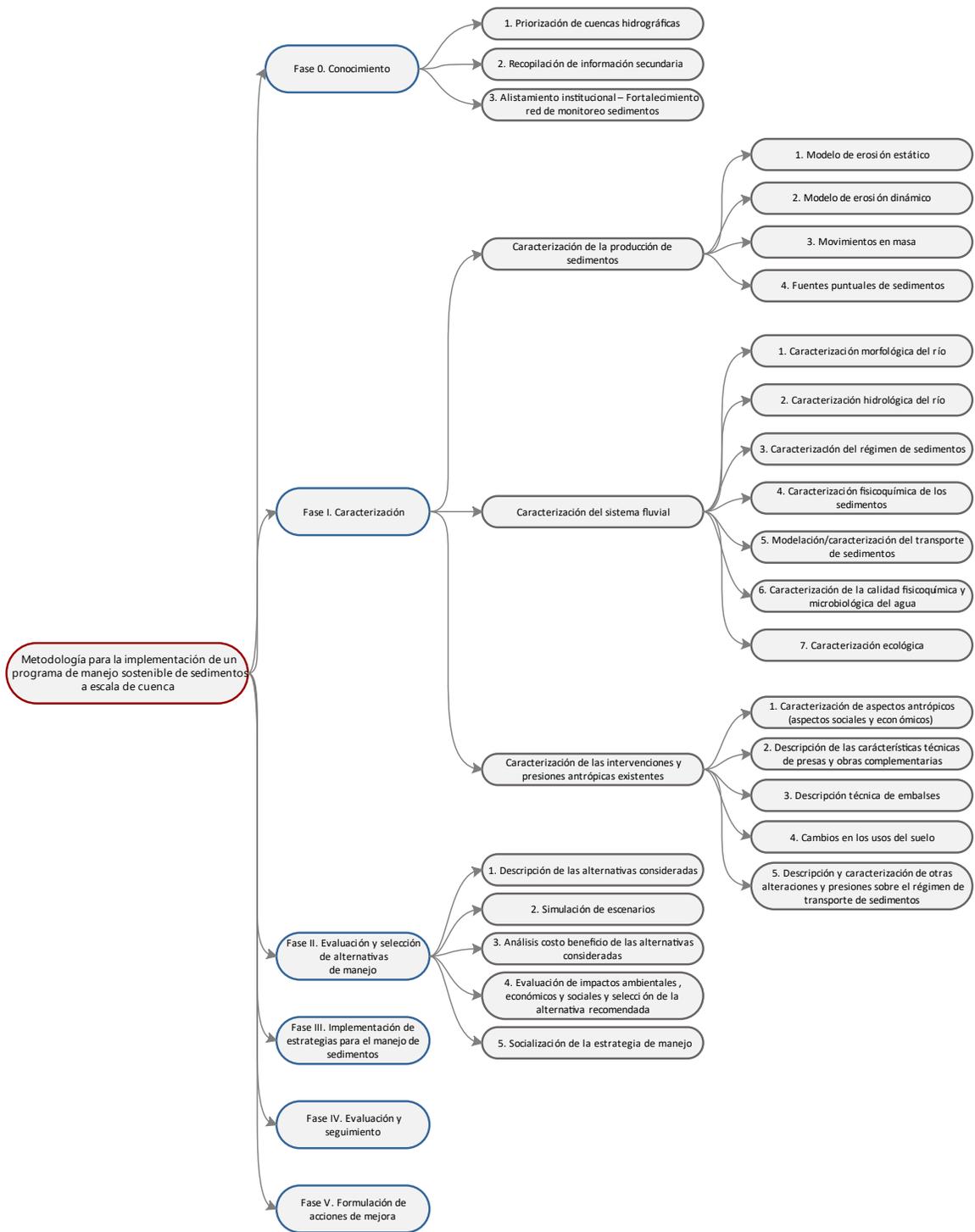


Figura 23. Propuesta de lineamientos para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica. Fuente: adaptado de González Parra & Moreno Barco, 2022.

2.4. Cálculo del transporte de sedimentos. Modelo HEC-RAS 1D

El objetivo del modelo de transporte de sedimentos unidimensional en HEC-RAS es estimar los cambios en el perfil longitudinal y las secciones transversales del cauce. Para lograr esto, el *software* estima las características hidráulicas del sistema y luego, con base en estos resultados, calcula el transporte de sedimentos en cada sección y define si se presentan procesos de sedimentación o erosión.

El modelo en HEC-RAS utiliza la curva granulométrica del material del lecho para estimar el potencial de transporte de sedimentos, por lo que el modelo no tiene en cuenta la carga de lavado, es decir, calcula únicamente la carga del material del lecho.

En este apartado se presentan las características del modelo de transporte de sedimentos en HEC-RAS en una dimensión.

2.4.1. Estructura del modelo

HEC-RAS incluye dos enfoques hidrodinámicos para realizar el análisis de transporte de sedimentos:

- Flujo cuasi-no permanente
- Flujo no permanente

Los modelos de transporte de sedimentos son la aplicación más común del enfoque de flujo cuasi-no permanente. En este caso, el modelo simula las series de caudales como una secuencia de flujos permanentes.

Este modelo de transporte de sedimentos también se puede realizar utilizando el enfoque de flujo no permanente; sin embargo, es necesario tener un modelo hidráulico preciso, calibrado y estable antes de realizar el análisis.

Independientemente del enfoque que se escoja, se necesitan tres tipos de archivos para construir un modelo de transporte de sedimentos:

- Archivo de geometría

- Archivo de caudales
- Archivo de información de sedimentos

En la Figura 24 se muestra la estructura de los archivos para modelos de transporte de sedimentos con flujo cuasi-no permanente y con flujo no permanente.

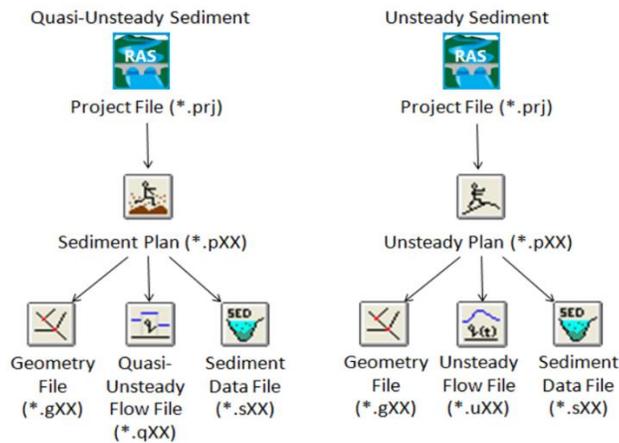


Figura 24. Estructura de los archivos para modelos de transporte de sedimentos con flujo cuasi-no permanente y con flujo no permanente. Fuente: U.S. Army Corps of Engineers, 2016a.

2.4.2. Funciones de transporte de sedimentos

HEC-RAS calcula el potencial de transporte de sedimentos para cada intervalo de clase de la granulometría del material del lecho con una de las ecuaciones.

HEC-RAS incluye ocho funciones de potencial de transporte de sedimentos en 1D. El transporte de sedimentos es sensible a muchas variables; por lo tanto, el potencial de transporte calculado con las diferentes ecuaciones puede variar en órdenes de magnitud, debido a que son ecuaciones empíricas y cada una se desarrolló en diferentes condiciones. En la medida de lo posible, se recomienda seleccionar una función de transporte desarrollada para granulometrías y parámetros hidráulicos similares a los del tramo del proyecto (U.S. Army Corps of Engineers, 2016a).

En la Tabla 4 se muestran las funciones de potencial de transporte de sedimentos, el modo de transporte que calcula, el tipo de aproximación que usa y una breve descripción de las condiciones particulares para las cuales fueron desarrolladas.

Tabla 4. Funciones de potencial de transporte de sedimentos en HEC-RAS 1D.

Ecuación	Tipo de transporte	Tipo de aproximación	Descripción
Ackers and White	Transporte total	Potencia de la corriente	Desarrollado a partir de datos de canal para granulometrías relativamente uniformes, que van desde arena hasta gravas finas. HEC-RAS muestra tres parámetros de la ecuación: el umbral de movilidad (A) y los coeficientes (C y m) para que los usuarios puedan calibrarlos. Sin embargo, son parámetros dinámicos, cambian con las propiedades de los sedimentos y el flujo. Los modeladores que opten por calibrar Ackers-White deben utilizar en su lugar los factores de escala.
Engelund-Hansen	Transporte total	Potencia de la corriente	Desarrollado a partir de datos de canal, utilizando tamaños de arena relativamente uniformes, entre 0.19 y 0.93 mm. A menudo puede calcular transportes bajos para partículas de tamaños grandes. Engelund-Hansen debe limitarse normalmente a sistemas de arena.
Laursen-Copeland	Transporte total	Esfuerzos cortantes	La versión de Copleand de la ecuación de Laursen fue desarrollada para partículas de tamaño desde limo grueso hasta gravas, esto le confiere la más amplia gama de aplicabilidad de las funciones de transporte incluidas en HEC-RAS. Es la única función de transporte desarrollada en el rango de limo grueso. Un trabajo no publicado en Colorado State (Watson, comunicación personal) demostró que esta ecuación superaba a otras funciones de transporte en el rango de arena muy fina y limo muy grueso. Se utiliza con el método de mezcla de Copeland (algoritmo de acorazamiento), si la ecuación se utiliza sola, sobrestima el potencial de transporte.
Meyer-Peter and Müller (MPM)	Transporte por arrastre	Esfuerzos cortantes	La MPM es estrictamente una ecuación de carga por arrastre, desarrollada a partir de experimentos de canal de arena y grava en condiciones de lecho plano. Los experimentos de MPM examinaron principalmente grava uniforme, lo cual hace que la función de transporte MPM sea más aplicable en sistemas de grava. La ecuación de MPM tiende a subestimar el transporte de materiales más finos.

Ecuación	Tipo de transporte	Tipo de aproximación	Descripción
Toffaleti	Transporte total	Probabilística	Desarrollada principalmente para partículas del tamaño de arena, sigue los principios básicos del enfoque de Einstein, sustituyendo algunos de los supuestos empíricos. Toffaleti suele aplicarse a "grandes ríos", ya que la mayoría de los datos utilizados para desarrollarla procedían de grandes sistemas de carga suspendida. Su desempeño es particularmente deficiente para partículas de tamaño de grava. HEC-RAS puede mostrar los resultados del transporte de cada zona por separado, aproximando el perfil de concentración vertical. A veces los modeladores utilizan esta función para calibrar las mediciones de carga suspendida, comparando la medición con el caudal sólido calculado de las tres zonas superiores.
MPM-Toffaleti	Transporte total	-	La ecuación de Toffaleti se desarrolló para ríos de gran tamaño y lecho de arena, y su desempeño no es bueno para partículas gruesas. Esta función combinada sustituye el componente del transporte por arrastre de Toffaleti por la ecuación de MPM, que es más apropiada para el material grueso.
Yang	Transporte total	Potencia de la corriente	La función fue desarrollada y probada sobre una variedad de datos de canal y de campo. La ecuación incluye dos relaciones separadas para el transporte de arena y grava. La ecuación de Yang tiende a ser muy sensible a la velocidad de la corriente, y es más sensible a la velocidad de caída que la mayoría de las otras funciones de transporte.
Wilcock and Crowe	Transporte por arrastre	Esfuerzos cortantes	Diseñada para ríos bien gradados que contienen tanto arena como grava. Los lechos solían estar acorazados, con un contenido de arena mucho menor en la superficie que en el subsuelo. Por lo tanto, los usuarios deben elegir algoritmos de capas activas y las granulometrías deben reflejar las propiedades de la superficie del lecho. Se recomienda utilizar siempre esta función con el método de mezcla del lecho de la capa activa (Active Layer). Para calibrar la ecuación de Wilcock & Crowe (2003) ajuste el factor de escala de movilidad (mobility scaling factor).

Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Ecuaciones del modelo

HEC-RAS es un modelo acoplado explícito, que para cada incremento computacional (Δt) realiza el tránsito hidráulico y de sedimentos en todo el tramo en estudio.

En primer lugar, el modelo calcula las características hidráulicas del sistema desde aguas abajo hacia aguas arriba para cada sección transversal. Luego, utilizando las ecuaciones de transporte de sedimentos y las características hidráulicas determinadas

previamente, realiza el tránsito de sedimentos desde aguas arriba hacia aguas abajo. Por último, el modelo actualiza las secciones transversales del cauce y comienza otra vez el ciclo para el siguiente incremento computacional (Australian Water School, 2019).

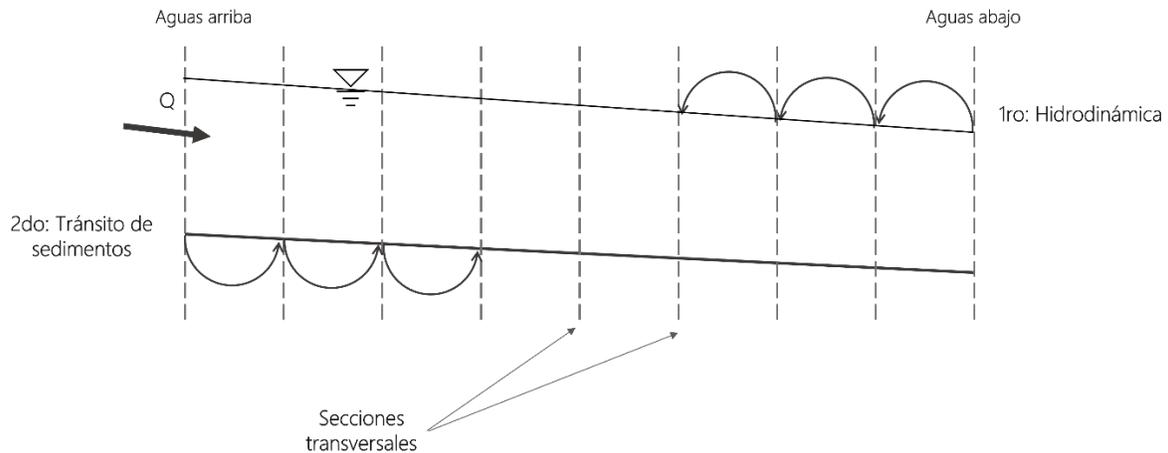


Figura 25. Acoplamiento entre las características hidráulicas y de sedimentos. Fuente: adaptado de Australian Water School, 2019.

Para realizar el tránsito de sedimentos, HEC-RAS resuelve la ecuación de Exner, la cual es una ecuación de conservación de la masa (o continuidad) que se aplica a los sedimentos de un sistema fluvial.

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\delta \eta}{\delta t} = - \frac{\delta Q_s}{\delta x}$$

Ecuación 31. Ecuación de Exner.

Donde:

B = ancho del canal

η = elevación del canal

λ_p = porosidad de la capa activa

t = tiempo

x = distancia

Q_s = carga de sedimentos transportada

La ecuación expresa que la diferencia entre el caudal sólido que sale del volumen de control y el caudal sólido que ingresa en un intervalo de tiempo es igual al volumen de material sólido acumulado o perdido en el interior, el cual se convierte en un ascenso o descenso de la elevación del fondo del cauce (Martín Vide, 1997) (Figura 26. Volumen de control de sedimentos. Fuente: adaptado de Australian Water School, 2019.Figura 26). Entonces, la ecuación de continuidad de sedimentos también se puede escribir como:

$$Q_{s(in)} - Q_{s(out)} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = (1 - \lambda_p)B \frac{\Delta \eta}{\Delta t}$$

Ecuación 32. Ecuación de continuidad de sedimentos.

Donde:

$Q_{s(in)}$ = caudal sólido ingresando al volumen de control

$Q_{s(out)}$ = caudal sólido saliendo del volumen de control

V = volumen de material sólido

HEC-RAS resuelve la ecuación de continuidad de sedimentos calculando una capacidad de transporte de sedimentos para el volumen de control ($Q_{s(out)}$), asociada a cada sección transversal, comparándola con el caudal de sedimentos ($Q_{s(in)}$) que entra en el volumen de control desde aguas arriba. Si la capacidad de transporte es mayor que el caudal sólido ingresando al volumen de control, HEC-RAS satisface el déficit mediante la erosión de los sedimentos del lecho. Si la oferta supera la capacidad, HEC-RAS deposita el excedente de sedimentos (U.S. Army Corps of Engineers, 2016a).

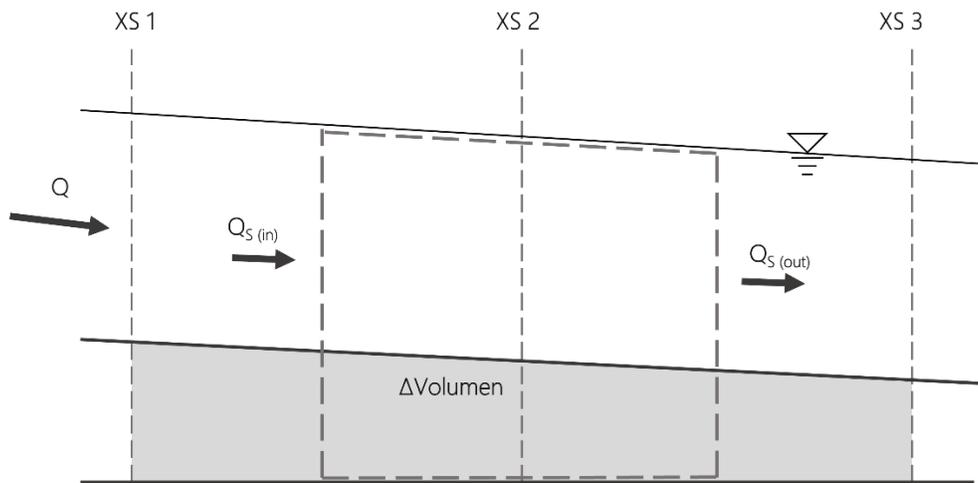


Figura 26. Volumen de control de sedimentos. Fuente: adaptado de Australian Water School, 2019.

Sin embargo, antes de erosionar o depositar los sedimentos en el volumen de control se deben tener en cuenta ciertos procesos físicos que limitan la cantidad de sedimentos que realmente se pueden erosionar o sedimentar en un intervalo de tiempo, a estos se les denominan *limitantes físicos*, que son: la velocidad de caída para la sedimentación y el acorazamiento para la erosión.

2.4.4. Ventajas y limitaciones

En general, algunas ventajas que ofrece el modelo HEC-RAS unidimensional son (Agrimensores, 2008):

- Alta velocidad de cálculo, lo cual permite realizar análisis en tramos largos de ríos.
- La simplificación del flujo turbulento tridimensional a un flujo unidimensional es relativamente aceptable para ríos a grandes escalas cuando no se necesita una alta precisión en los resultados.
- Permite el análisis con secciones naturales irregulares (cauces fluviales: cauce principal y llanuras de inundación).
- Licencia gratuita.

Por otra parte, también se deben considerar las siguientes limitaciones del modelo de transporte de sedimentos unidimensional en HEC-RAS (Australian Water School, 2019):

- Los resultados del modelo HEC-RAS 1D se deben analizar a nivel de *tramos*. No es recomendable realizar análisis sobre los resultados de los cambios en secciones transversales individuales.
- Debido a las características de la dinámica fluvial, los análisis de transporte de sedimentos deben realizarse con simulaciones de duración mayor a un año, preferiblemente más de una década. No es recomendable realizar análisis sobre eventos individuales, como por ejemplo, crecientes.
- En el modelo se utilizan ecuaciones de transporte de sedimentos, las cuales son funciones empíricas, por lo que se debe calibrar para producir resultados confiables.
- Es un modelo unidimensional, por lo que no tiene un buen desempeño en el análisis de zonas de amortiguamiento, derivaciones de flujo y procesos de sedimentación en las llanuras.
- Solamente se puede realizar el análisis de transporte de sedimentos de flujos newtonianos, es decir, aquellos con concentraciones de sólidos menor al 5-10%.
- La información de campo de aforos sólidos normalmente es escasa, por lo cual el alcance del modelo de transporte de sedimentos puede ser muy limitado.
- Al realizar el modelo de transporte de sedimentos se debe tener previamente un modelo hidráulico calibrado para evitar errores de convergencia durante la simulación.
- Sólo se pueden modelar cauces con pendientes menores al 10%, debido a que no se tiene en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua en las ecuaciones.

Capítulo III. Propuesta metodológica para el análisis de transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos

Para el planteamiento de la metodología se tuvieron en cuenta las actividades que se deben desarrollar para elaborar un modelo unidimensional en HEC-RAS que permita el análisis del transporte de sedimentos en cauces aluviales. En la Figura 27 se muestra un diagrama con los pasos propuestos.

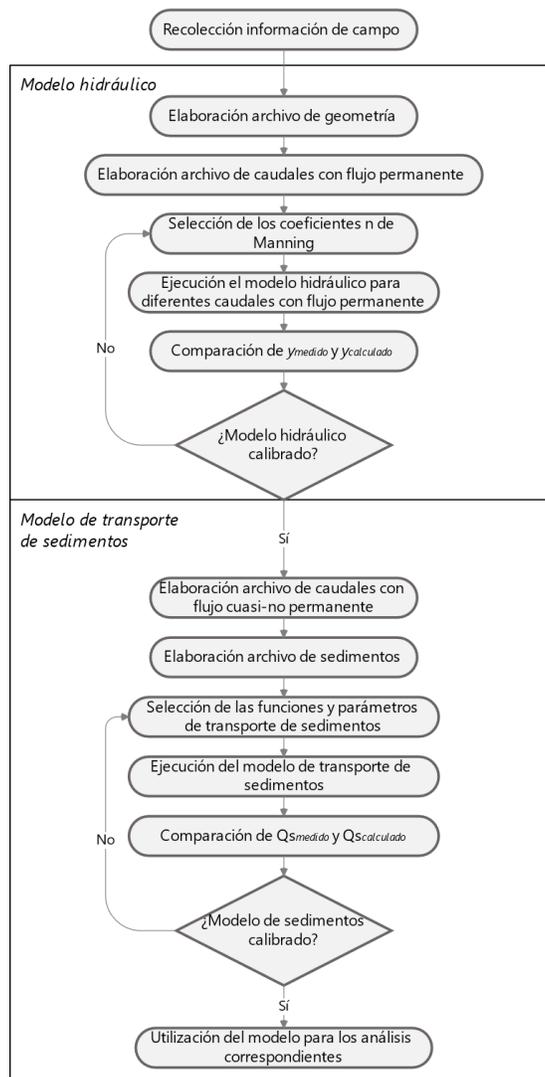


Figura 27. Propuesta metodológica para el análisis de transporte de sedimentos en cauces pequeños y medianos. Fuente: elaboración propia.

3.1. Información de campo. Recopilación de información

3.1.1. Información geométrica

Para el modelo de transporte de sedimentos se utiliza la misma geometría que para un modelo hidráulico. En términos generales, se necesitan las secciones transversales del río que se va a analizar. Esta información se puede obtener a partir de levantamientos topobatimétricos, ingresando individualmente las secciones transversales, o se mediante la construcción de un modelo de terreno.

Adicionalmente, se requiere información de la cobertura vegetal de la zona de estudio para definir los coeficientes de rugosidad de Manning (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

3.1.2. Información hidráulica

La información requerida para el modelo hidráulico con flujo permanente (el que se va a utilizar para realizar la calibración hidráulica) corresponde a los caudales líquidos medidos en campo y los niveles de la lámina de agua en el momento en que se realizó el aforo líquido, con el objetivo de comparar los niveles de la lámina de agua medidos y simulados y realizar la calibración hidráulica, ajustando los valores de los coeficientes de rugosidad de Manning.

Para el modelo de transporte de sedimentos con flujo cuasi no-permanente se necesitan los caudales líquidos que se requieran simular para la condición de frontera aguas arriba. También es necesario el valor de la temperatura del agua, debido a que la velocidad de caída y algunas ecuaciones de transporte de sedimentos son sensibles a la viscosidad del agua, que es función de su temperatura. Para la condición de frontera aguas abajo se puede utilizar la profundidad de la lámina de agua normal, una serie de tiempo de elevaciones de la superficie libre del agua o una curva de calibración (caudal vs. elevación de la superficie libre). Esta condición de frontera se escoge con base en las características del sistema y la información disponible.

3.1.3. Información de sedimentos

En general, se necesitan dos tipos de información de sedimentos: una correspondiente al material del lecho disponible y otra al caudal sólido que ingresa al sistema en la sección aguas arriba.

3.1.3.1. Granulometría del material del lecho

Cada sección transversal requiere datos de granulometría inicial del material del lecho. Sin embargo, en lugar de exigir a los usuarios que introduzcan individualmente las granulometrías para cada sección transversal, HEC-RAS utiliza un concepto de plantilla en el cual los usuarios definen las granulometrías de sedimentos en una base de datos y luego las asocian con las secciones transversales apropiadas (U.S. Army Corps of Engineers, 2016b). La granulometría del material del lecho se puede ingresar como porcentaje retenido o como porcentaje que pasa.

HEC-RAS estima el potencial de transporte de sedimentos en cada sección transversal con base en la granulometría del material del lecho asociada en cada una de éstas.

3.1.3.2. Caudal sólido

En las condiciones de frontera de sedimentos se requieren aforos líquidos y sólidos que permitan asociar la carga de sedimentos que transporta un caudal líquido dado. Además del valor de la carga total de sedimentos, se necesita la granulometría del material transportado, que sólo se puede ingresar como porcentaje retenido.

El caudal sólido está compuesto por el material transportado por arrastre y el material en suspensión. El aforo del material en suspensión es relativamente sencillo; sin embargo, tomar muestras representativas del material por arrastre resulta difícil (Food and Agriculture Organization (FAO), s.f.), razón por la cual normalmente se tiene mayor cantidad de datos del caudal sólido en suspensión que del caudal sólido por arrastre.

Algunas de las estrategias utilizadas para completar la información del caudal sólido por arrastre son: determinarlo como carga de equilibrio a partir de ecuaciones de potencial de transporte, asumirlo como un porcentaje del caudal sólido en suspensión, y si las características del sistema fluvial lo permiten, asumir que el caudal sólido por arrastre es despreciable en comparación con el caudal sólido por suspensión y tener en cuenta únicamente este último.

3.2. Modelo hidráulico unidimensional

3.2.1. Elaboración del archivo de geometría

A partir de la información tomada en campo, en HEC-RAS se debe construir el archivo de geometría, que básicamente consiste en establecer el esquema del sistema fluvial, introducir las secciones transversales del río, ubicar los afluentes y añadir los datos de las estructuras hidráulicas del sistema (HEC RAS, 2016).

3.2.2. Elaboración del archivo de caudales con flujo permanente

Con los caudales aforados se elabora el archivo de caudales con flujo permanente. Las condiciones de frontera disponibles en HEC-RAS para flujo permanente en una dimensión son: elevación de la superficie libre, profundidad de la lámina de agua crítica, profundidad de la lámina de agua normal y curva de calibración (caudal vs. elevación de la superficie libre). La condición de frontera aguas arriba y aguas abajo se escoge dependiendo de las características del sistema.

3.2.3. Calibración del modelo hidráulico

El proceso de calibración de un modelo consiste en modificar uno o varios parámetros o variables con el propósito de que los resultados estimados con el modelo numérico sean lo más cercano posible a los resultados medidos o tomados en campo (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022). En el caso del modelo hidráulico, la variable que se puede modificar para ajustar los valores simulados es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Se ejecuta la simulación con flujo permanente, se extraen los resultados de la elevación de la superficie libre simulada y se calcula el error entre los valores simulados y los medidos. Se ajustan los coeficientes de Manning multiplicándolos por un factor K y se repite el proceso las veces que sean necesarias hasta minimizar el error entre la elevación de la superficie libre obtenida con el modelo y las medidas en campo.

3.3. Modelo de transporte de sedimentos unidimensional

3.3.1. Elaboración del archivo de caudales con flujo cuasi no-permanente

Para elaborar el archivo de caudales con flujo cuasi-no permanente es necesario definir como condición de frontera aguas arriba una serie de caudales líquidos. Como condición de fronteras aguas abajo, HEC-RAS permite escoger entre tres opciones: profundidad de la lámina de agua normal, serie de elevaciones de la superficie libre y curva de calibración (caudal vs. elevación de la superficie libre). Esta condición de frontera se escoge dependiendo de las características del sistema y de la información disponible recolectada en el inciso 3.1.2 Información hidráulica.

En caso de que el río tenga afluentes, se debe ingresar la serie de caudales de dichos afluentes como una condición de frontera interna, llamada "serie de caudales laterales". El enfoque de flujo cuasi-no permanente incluye en el modelo el caudal lateral aguas abajo de la sección transversal especificada. En la Figura 28 se muestra un ejemplo de la forma como el modelo tiene en cuenta los aportes laterales. Entonces, si se debe incluir un afluente al tramo de estudio es necesario ingresar el caudal en la sección aguas arriba de donde realmente está el afluente.

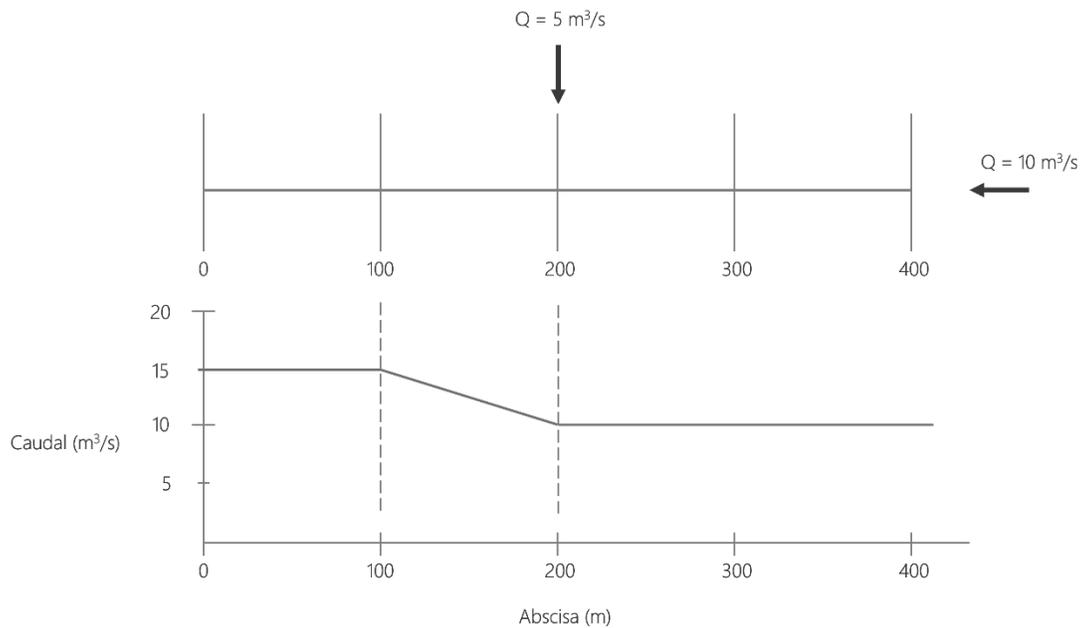


Figura 28. Esquema del cambio del caudal en el tramo de estudio asociado a la ubicación del caudal lateral.

Fuente: adaptado de (U.S. Army Corps of Engineers, 2016b).

En la ventana de edición del archivo de caudales también se debe ingresar la información de la temperatura del agua.

3.3.2. Elaboración del archivo de características de sedimentos.

Selección de ecuaciones de transporte

En el editor de la información de sedimentos aparecen cuatro pestañas, de las cuales solamente se utilizan las primeras dos para la modelación unidimensional:

- Condiciones iniciales y parámetros de transporte (*Initial Conditions and Transport Parameters*)
- Condiciones de frontera (*Boundary Conditions*)

A continuación, se explica la información que se debe introducir en cada una de estas pestañas.

3.3.2.1. Condiciones iniciales y parámetros de transporte (Initial Conditions and Transport Parameters)

En esta pestaña aparece una tabla con cada una de las secciones transversales definidas en la geometría, el tramo y el río al que pertenecen, y la elevación del fondo del cauce en cada sección (Figura 29).

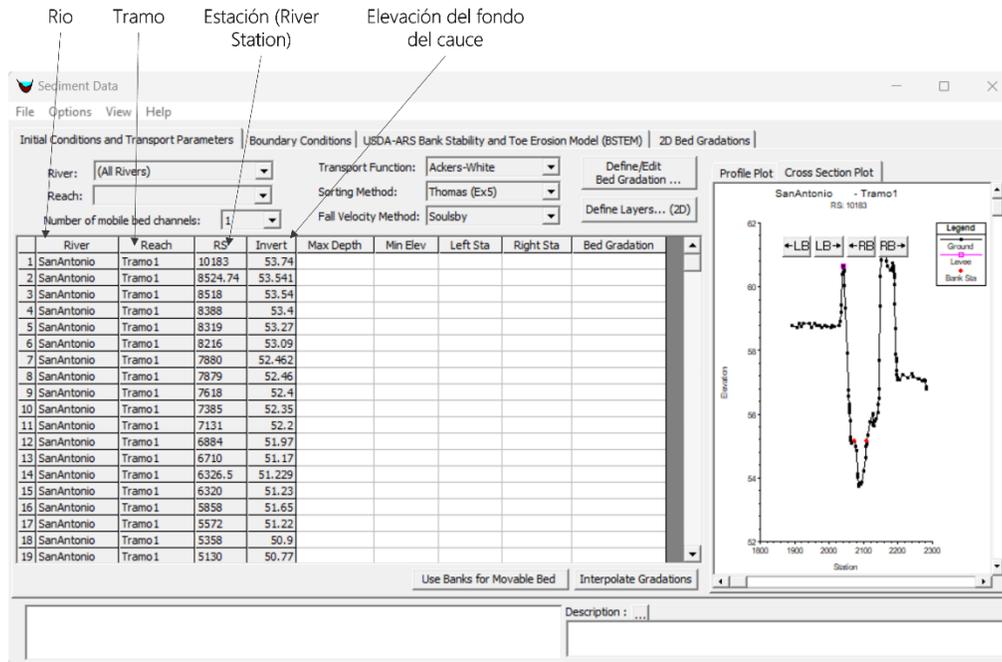


Figura 29. Editor de información de sedimentos en HEC-RAS. Fuente: elaboración propia.

3.3.2.1.1. Maximum Depth/Minimum Elev

Se debe definir el volumen de control que contiene sedimentos que pueden ser erosionados (Figura 30). Para definir la altura del volumen de control se debe especificar la máxima profundidad (*Max Depth*) o la mínima elevación (*Min Elev*), solamente se puede definir en cada sección alguna de las dos opciones. La mínima elevación define una cota fija hasta la que se puede erosionar, esta opción se utiliza cuando se sabe la altura a la que está un estrato de roca; sin embargo, en cauces aluviales es más común utilizar la máxima profundidad que se puede erosionar (Gibson, 2019).

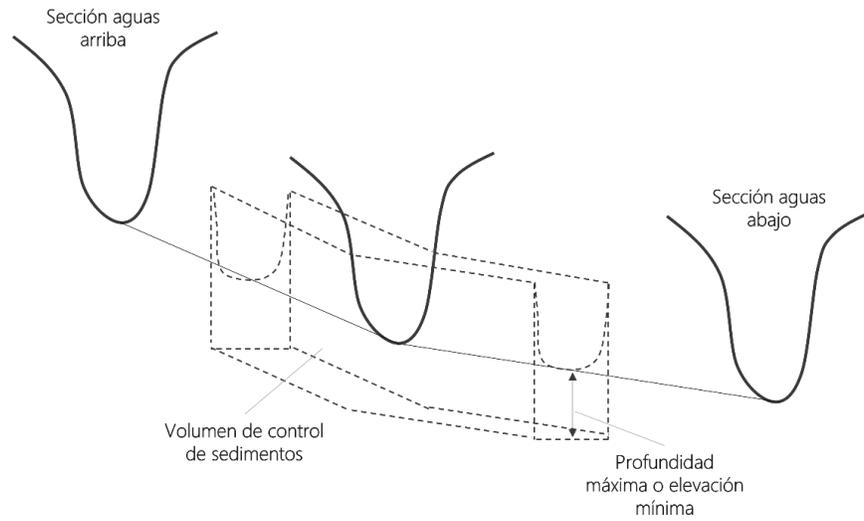


Figura 30. Volumen de control de sedimentos (*Max Depth or Min Elev*). Fuente: adaptado de U.S. Army Corps of Engineers, 2016b.

3.3.2.1.2. *Movable Bed*

Para terminar de definir el volumen de control de sedimentos se necesita la extensión horizontal en la que se va a permitir que haya erosión. El botón “*Use Banks for Movable Bed*” permite definir como los límites del lecho móvil (límites erosionables) (Figura 31) las bancas que delimitan el cauce principal.

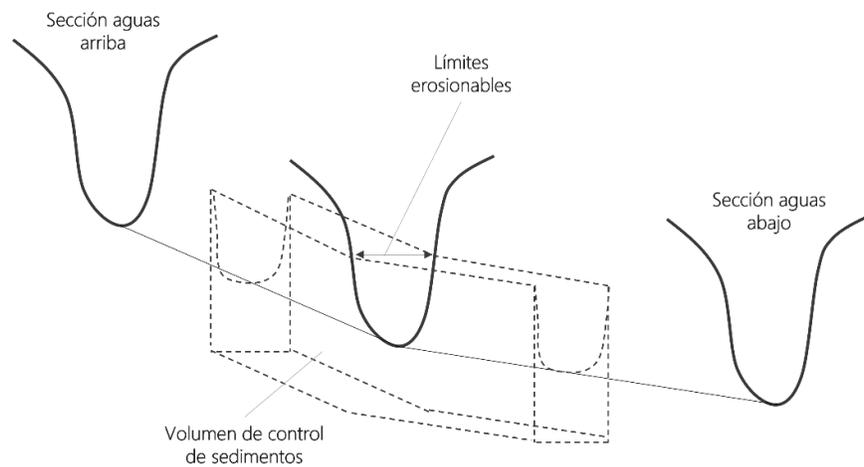


Figura 31. Volumen de control de sedimentos (*Movable bed*). Fuente: adaptado de U.S. Army Corps of Engineers, 2016b.

3.3.2.1.3. *Bed Gradation*

El siguiente paso es definir la granulometría del material del lecho asociada a cada sección transversal. Normalmente no se tienen muestras del material del lecho en cada una de las secciones transversales, pero en HEC-RAS hay opciones que permiten interpolar estas granulometrías o definir la misma granulometría en múltiples secciones.

Para ingresar las curvas granulométricas al modelo HEC-RAS se selecciona el botón "*Define/Edit Bed Gradation*", para definir lo que denominan "plantillas" de granulometría. La granulometría del material del lecho se puede introducir como porcentaje que pasa (*%Finer*) o como porcentaje retenido entre los tamices (*Grain Class%*).

3.3.2.1.4. *Transport function*

Con base en las características del sistema, se escoge la ecuación de transporte de sedimentos que se va a utilizar. Estas ecuaciones se presentaron en el inciso 2.4.2. Funciones de transporte de sedimentos.

3.3.2.1.5. *Sorting Method*

Una capa de lecho acorazada puede limitar la erosión en el cauce. Los algoritmos de acorazamiento estiman una limitación en la cantidad de material del lecho que se puede erosionar. Los métodos disponibles en HEC-RAS unidimensional son:

- Thomas Mixing Method (Exner 5)
- Copeland Mixing Method (Exner 7)
- Active Layer Mixing Method

3.3.2.1.6. *Fall Velocity Method*

El modelo deposita la cantidad de sedimentos que físicamente pueden caer al lecho en un intervalo de tiempo dado, con base en la velocidad de caída de la partícula. Los métodos disponibles para estimar la velocidad de caída son:

- Ruby
- Toffaleti
- Van Rijn
- Dietrich
- Report 12

3.3.2.2. *Boundary Conditions (Condiciones de frontera)*

Como condición de frontera de sedimentos, básicamente lo que se necesita es el caudal sólido que ingresa al sistema y la granulometría de este material en cada intervalo de tiempo; sin embargo, casi nunca se tiene una serie de tiempo de caudales sólidos a diferencia de los caudales líquidos. Por esta razón, se tienen diferentes opciones para definir la condición de frontera aguas arriba de sedimentos.

Las opciones disponibles de condición de frontera aguas arriba son (U.S. Army Corps of Engineers, 2016a):

- **Rating Curve** (curva de calibración). Calcula el caudal sólido ingresando al sistema con base en el caudal líquido.
- **Sediment Load Series** (serie de tiempo de caudales sólidos). Es poco común, debido a que la información de sedimentos normalmente es escasa.
- **Equilibrium Load**. HEC-RAS calcula la carga de sedimentos en la sección de aguas arriba con base en la granulometría del lecho y la función de transporte, y la utiliza como el caudal sólido que está ingresando al sistema. Esta es una condición de equilibrio, en la que la sección transversal no se erosiona ni se sedimenta, lo cual es muy poco probable que realmente esté pasando en el sistema.
- **Capacity Ratio**. Multiplica la carga de equilibrio por un factor definido por el usuario.
- **Clear Water (no Sed)**. Se utiliza para definir una condición de frontera en la que no están entrando sedimentos al sistema. Se puede usar, por ejemplo, cuando aguas arriba se tiene una presa y el caudal que descarga está prácticamente libre de sedimentos. Esta condición de frontera normalmente genera erosión en el sistema.

3.3.2.3. *Opciones de cambio en el lecho (Bed Change Options)*

En cada volumen de control se determina un volumen de sedimentos que se erosiona o se deposita. A partir de esta estimación se modifica la sección transversal del

cauce. HEC-RAS utiliza por defecto el método Veener, que cambia todos los nodos mojados dentro de los límites del lecho móvil a la misma distancia vertical.

Existe un método alternativo que permite la sedimentación en la llanura. Esta opción maneja la erosión de la misma forma que el método por defecto, confinándola a los límites del lecho móvil. Sin embargo, para el caso de la sedimentación, HEC-RAS distribuye el cambio de lecho de forma equitativa entre todos los nodos mojados, independientemente de que estén o no entre los límites del cauce principal. El principio en el que se basa este método es que las velocidades de erosión o esfuerzos cortantes se limitan al canal principal, pero la sedimentación puede producirse en la llanura de inundación, donde el agua que se mueve lentamente permite que el material se deposite (U.S. Army Corps of Engineers, 2016a).

3.3.3. Ejecución del plan de transporte de sedimentos

Se escogen los archivos de geometría, caudal y sedimentos que se utilizarán en el análisis. HEC-RAS permite definir el nivel de salida de los resultados (*Output Level*), que puede ser un valor del 1 al 6. Mientras mayor sea el número es más la cantidad de información y parámetros que se muestran en los resultados. El *Output Level 3* es el valor por defecto. La diferencia entre el nivel 3 y el 4 básicamente es que la información se muestra por cada intervalo de clase de la granulometría del lecho.

HEC-RAS calcula los resultados del transporte de sedimentos en unidades de masa, pero puede convertirlos a unidades de volumen dividiendo la masa por el peso unitario del material (que es diferente para arcilla, limo y material granular). Generalmente, se utilizan los resultados en términos del volumen para calibrar el modelo, ya que la información que generalmente se tiene son batimetrías históricas, las cuales se pueden convertir en volumen, multiplicando la diferencia del área por la longitud del tramo del volumen de control.

3.3.4. Calibración del modelo de transporte de sedimentos

Esta calibración se puede realizar de diversas formas, dependiendo de la información que se tenga disponible. Generalmente se utilizan los siguientes enfoques:

- **Batimetrías históricas.** Se comienza con secciones transversales históricas y se calibran ejecutando el modelo desde el periodo de registro entre estas secciones y una batimetría contemporánea.
- **Curva de calibración caudal líquido-carga de sedimentos.** En una sección transversal diferente a la de aguas arriba y en la que se tenga una curva de calibración de sedimentos a partir de datos de campo, se compara y ajustan los resultados del modelo hasta que las cargas de sedimentos simuladas sean similares a las medidas en campo.

Para ajustar los resultados simulados y medidos, después de escoger la función de transporte de sedimentos que mejor se ajuste a las condiciones de frontera, se puede utilizar la opción de calibrar la función de transporte con factores de escala. El modelo permite definir los siguientes factores de escala:

- **Transport Function Scaling Factor.** Este es un factor lineal en la función de transporte. Por ejemplo, 1,1 aumenta la capacidad de transporte en 10% y 0,9 disminuye la capacidad en 10% (U.S. Army Corps of Engineers, 2016b).
- **Critical Mobility Scaling Factor.** Este factor afecta la competencia de la corriente (el caudal mínimo que puede mover un tamaño dado de partícula) y la capacidad de transporte. Está inversamente relacionado con el caudal. Por ejemplo, un factor de 1,1 hará que las partículas de sedimento necesiten un caudal mayor para empezar a moverse y, por lo tanto, disminuirá el transporte. Sus efectos no son lineales. Este factor de escala no aplica para las ecuaciones de Toffaleti y de Engelud-Hansen, debido a que no tienen parámetros críticos de movilidad (U.S. Army Corps of Engineers, 2016b).

3.3.5. Utilización del modelo para los análisis correspondientes

Después de realizar la calibración hidráulica y de sedimentos del modelo unidimensional se procede a simular los escenarios que se requieren analizar.

Capítulo IV. Caso de estudio en el departamento del Cesar: arroyo San Antonio

4.1. Generalidades

El arroyo San Antonio es un cauce aluvial cuya cuenca se encuentra dentro del área del proyecto minero La Loma, al sur del departamento del Cesar. En el año 2018 la ampliación del tajo de explotación minera hacia el sur del proyecto exigió que se construyera el realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022) . El tramo del arroyo desde el embalse Paujil hasta la entrega del realineamiento No. 4 se caracteriza por ser unicanal, con una sinuosidad relativamente baja, en el transporte de sedimentos por el canal dominante predomina la carga de lavado. La carga del material del lecho es baja y está conformada por material granular de tamaño fino a medio. En este tramo, tres afluentes (caño Piedras, caño NN y caño Melánquez) descargan sus aguas al realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio (Figura 32).

Debido a las condiciones de la operación minera, el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito realizó en el año 2022 el diseño del canal del realineamiento definitivo del arroyo San Antonio, que inicia en las coordenadas 1065529.80E, 1544559.32N y entrega al cauce natural del arroyo San Antonio en las coordenadas 1062020.42 E, 1547510.99N, aguas abajo del proyecto minero (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022). En la Figura 32 se muestra un esquema de la ubicación actual del cauce (realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio) y del realineamiento definitivo proyectado.

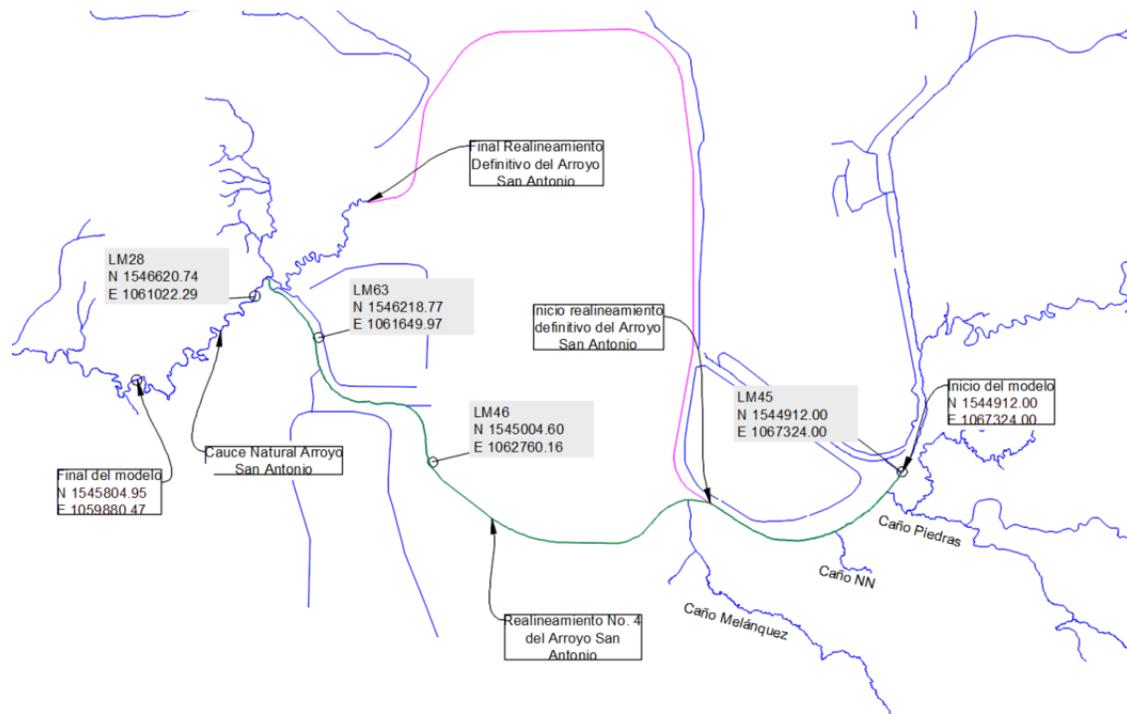


Figura 32. Esquema de la condición actual y la condición futura del tramo en estudio del arroyo San Antonio.

Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Con el fin de comparar la dinámica del transporte de sedimentos en el realineamiento definitivo con el que se presenta actualmente en el cauce se elaboraron dos modelos: uno para la condición actual y otro para la condición futura. Seguidamente se presenta el proceso de elaboración y las consideraciones de las modelaciones.

4.2. Recopilación de la información de campo

Se realizaron tres campañas de aforos líquidos y sólidos con el propósito de realizar la calibración hidráulica y recopilar la información necesaria para los datos de entrada del modelo de transporte de sedimentos. Estos aforos se realizaron en cuatro estaciones limnimétricas (LM45, LM46, LM63 y LM68) sobre el canal del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio. La ubicación de las estaciones se muestra en la Figura 32.

Para cada caudal líquido registrado, en cada estación se midió la elevación de la superficie libre, se aforó el caudal sólido por arrastre y el caudal sólido por suspensión y se

construyeron las curvas granulométricas del material transportado por arrastre, cuya información granulométrica sólo se pudo obtener para las campañas de julio y agosto de 2022. A la muestra del material transportado en suspensión no le fue posible construir la curva granulométrica, debido a que el volumen obtenido en el muestreo fue muy pequeño, de acuerdo con lo establecido en la norma. Con base en la información disponible, se construyó una curva granulométrica aproximada para este material transportado en suspensión. Adicionalmente, se construyó la curva granulométrica para las muestras del material del lecho tomadas en cada estación (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

En la Tabla 5 se presenta un resumen de la información disponible en cada estación y en el Anexo 1 la información tomada en campo en cada estación, para cada campaña de medición.

Tabla 5. Resumen de la información obtenida de las campañas de aforos líquidos y sólidos

Información de campo		LM45	LM46	LM63	LM28
Granulometría del lecho		Ver anexo 1	Ver anexo 1	Ver anexo 1	Ver anexo 1
Campaña #1 (junio 2022)	Nivel de la lámina de agua (msnm)	54.800	50.415	45.615	44.497
	Caudal líquido (m ³ /s)	6.97	9.58	10.05	10.64
	Caudal sólido en suspensión (ton/día)	28.19	50.51	68.69	63.33
	Caudal sólido por arrastre (ton/día)	8.02	7.53	30.02	8.31
	Curva granulométrica del material en suspensión	No se pudo realizar			
Curva granulométrica del material por arrastre		No se pudo realizar			
Campaña #2 (julio 2022)	Nivel de la lámina de agua (msnm)	54.359	50.479	45.231	44.521
	Caudal líquido (m ³ /s)	5.85	5.82	4.79	5.31
	Caudal sólido en suspensión (ton/día)	10.98	25.61	11.26	27.53
	Caudal sólido por arrastre (ton/día)	5.13	6.81	21.00	12.87
	Curva granulométrica del material en suspensión	No se pudo realizar			
Curva granulométrica del material por arrastre		Ver Anexo 1	Ver Anexo 1	Ver Anexo 1	Ver Anexo 1
Campaña #3 (agosto 2022)	Nivel de la lámina de agua (msnm)	54.309	50.549	45.311	44.771
	Caudal líquido (m ³ /s)	6.52	7.04	6.68	6.78
	Caudal sólido en suspensión (ton/día)	70.60	69.31	66.47	70.51
	Caudal sólido por arrastre (ton/día)	6.49	5.24	6.16	4.25
	Curva granulométrica del material en suspensión	No se pudo realizar			
Curva granulométrica del material por arrastre		Ver anexo 1	Ver anexo 1	Ver anexo 1	Ver anexo 1

Fuente: adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

4.3. Modelo de la condición actual

En este apartado se explica el proceso de elaboración y calibración del modelo hidráulico y de transporte de sedimentos de la condición actual. Este modelo empieza en las coordenadas 1067325.37E, 1544910.63N sobre el realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio y finaliza en las coordenadas 1060785.01E, 1546451.07 N sobre su cauce natural, aguas abajo de la entrega del actual canal del realineamiento No. 4 (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

4.3.1. Modelo hidráulico de la condición actual

4.3.1.1. *Elaboración del archivo de geometría*

La generación de la geometría del modelo en HEC-RAS de la condición actual se realizó a partir de un modelo de terreno, que se construyó utilizando el levantamiento LIDAR de la zona minera, e información de levantamientos batimétricos realizados sobre el canal del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio para ajustar las cotas de fondo del canal. Con este modelo y las herramientas RasMapper y ArcGIS se generaron las secciones transversales para el modelo hidráulico de la condición actual.

Para definir los coeficientes de rugosidad de Manning se utilizaron los mapas de cobertura vegetal realizados en la zona minera y los mapas de uso del suelo y tipo de suelo disponibles en el IGAC. Para cada superficie combinada de tipo de cobertura, tipo de suelo y uso del suelo se definió un coeficiente de Manning, con base en la bibliografía especializada, y se generó una superficie de coeficientes de Manning. En la Figura 33 se presenta la geometría del modelo de la condición actual y la superficie de coeficientes de rugosidad de Manning generada.

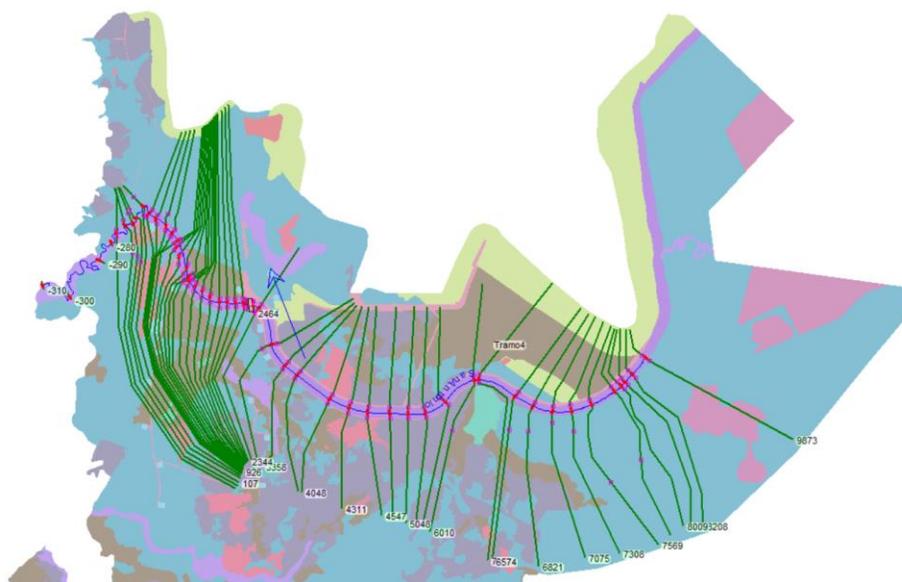


Figura 33. Geometría del modelo de la condición actual. Superficie de coeficientes de rugosidad de Manning.
 Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En el modelo no se presentan los afluentes al realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio (caño Piedras, caño NN y caño Melánquez), debido a “que no se busca analizar el comportamiento hidráulico de estos cauces, ya que no tendrán intervenciones o modificaciones en sus alineamientos, secciones transversales o perfil longitudinal ni se modificarán sus estructuras de entrega” (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022). No obstante, en la modelación se tendrán en cuenta los caudales aportados por estos cauces.

4.3.1.2. Elaboración del archivo de caudales con flujo permanente

Con el fin de ajustar y calibrar el modelo hidráulico se modelaron los caudales medidos en la campaña de aforo de junio del 2022 (Campaña #1 de la Tabla 5), con la opción de flujo permanente. Se ubicó la sección transversal más cercana a cada estación de aforo y en esos sitios se ubicaron los caudales líquidos aforados en la primera campaña (Figura 34).

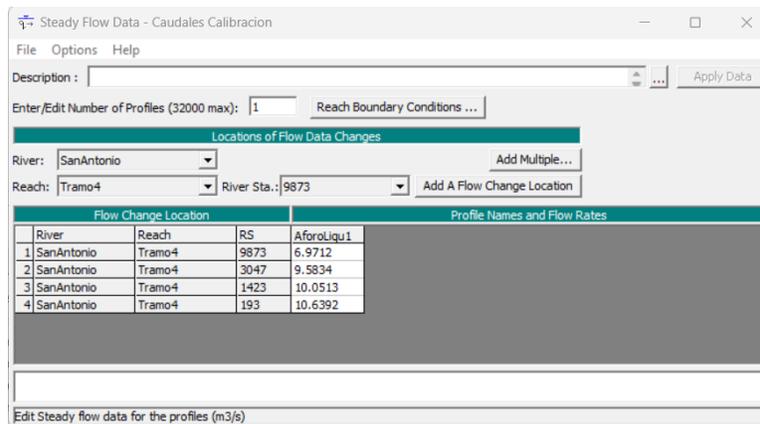


Figura 34. Caudales líquidos modelados en flujo permanente para el modelo de la condición actual. Fuente: adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En el estudio se definió como condición de frontera aguas abajo la profundidad normal, debido a que el tramo natural del arroyo San Antonio aguas abajo de la entrega del realineamiento No. 4 puede presentar niveles de la lámina de agua cercanas a las de un flujo uniforme. Aguas arriba también se definió la misma condición de frontera, ya que el punto inicial del modelo corresponde al punto final del actual canal de descarga del embalse Paujil, que es relativamente largo y con una pendiente media relativamente alta (0,001373 m/m), por lo que en su punto final (inicio del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio) presenta todas las características para que se presente flujo uniforme (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022). En la Figura 35 se muestran las condiciones de frontera definidas en el modelo.

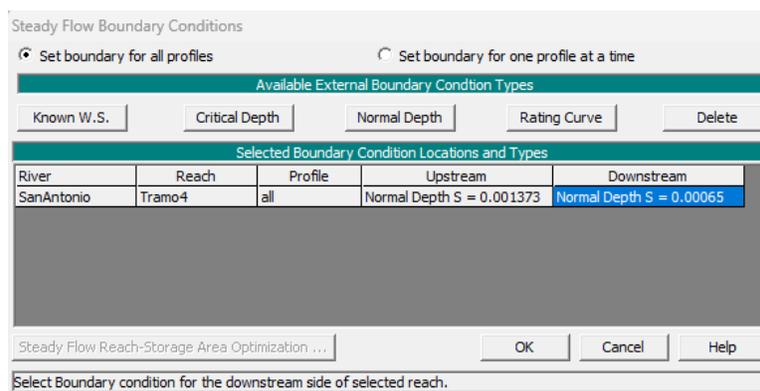


Figura 35. Condiciones de frontera hidráulicas del modelo de la condición actual. Fuente: adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

4.3.1.3. Calibración del modelo hidráulico

La calibración del modelo hidráulico de la condición actual se realizó con base en los resultados de aforos líquidos de la campaña #1, en el cual se compararon los niveles de la lámina de agua medidos para esos caudales y los niveles modelados. La variable que se puede modificar para ajustar los valores modelados es el coeficiente de rugosidad de Manning. Como se explicó en el inciso 4.3.1.1, se elaboró una superficie de coeficientes de rugosidad de Manning, debido a que cada sección transversal tiene diferentes valores para estos coeficientes, por lo cual se multiplicó cada coeficiente por un factor K, mayor a 0 y menor a 2. Se realizaron simulaciones para cada uno de estos nuevos valores de coeficientes de rugosidad y se registraron los niveles para compararlos con los medidos (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

Con base en las simulaciones se determinó que el menor error entre los niveles medidos y simulados se obtenía con un factor K de 1,4. En la Figura 36 se muestran los resultados de los niveles de la lámina de agua estimados con el modelo hidráulico y los niveles tomados en campo.

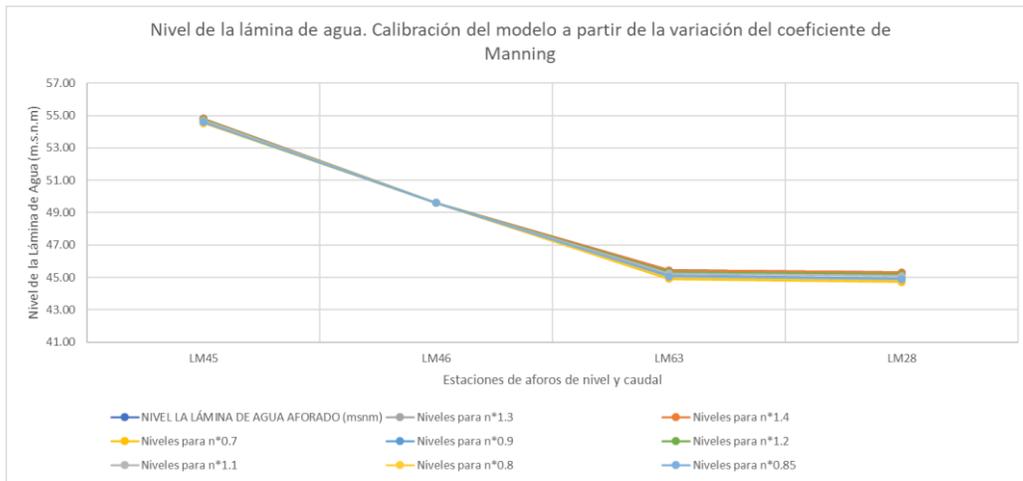


Figura 36. Comparación entre los niveles de la lámina de agua medidos en campo y los niveles de agua resultados del modelo hidráulico para los mismos caudales. Calibración del modelo. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Con el modelo hidráulico calibrado ya se puede realizar el modelo de transporte de sedimentos.

4.3.2. Modelo de transporte de sedimentos de la condición actual

4.3.2.1. *Elaboración del archivo de caudales con flujo cuasi no-permanente*

Debido a la dinámica de los cauces asociada con el ciclo hidrológico, se recomienda que las simulaciones en HEC-RAS se ejecuten para un periodo mínimo de un año, pero preferiblemente que se realicen en escalas decadales.

La estación LM45 cuenta con una serie de caudales diarios de un periodo de 17 meses. Estos caudales se limitaron para que los que se ingresaran al modelo no superaran el caudal dominante ($5,5 \text{ m}^3/\text{s}$), para analizar los procesos en el cauce principal. Con base en los estudios hidrológicos realizados por el Centro de Estudios Hidráulicos y en la serie de caudales líquidos de la estación LM45, también fue posible generar series de caudales en las entregas de los afluentes al modelo. Con el fin de analizar los procesos de sedimentación y erosión generados en el cauce, estas series se extendieron para un periodo de 10 años (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022). En la Figura 37 se muestran las series de caudales generadas.

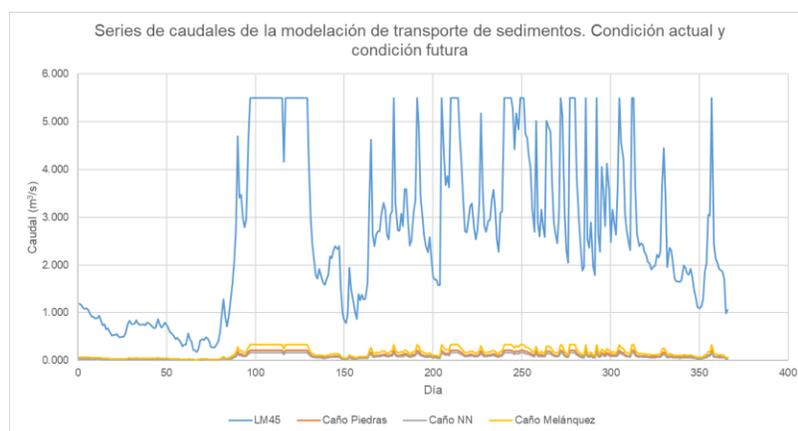


Figura 37. Series de caudales para la modelación de transporte de sedimentos. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Aguas abajo se definió como condición de frontera la profundidad normal, debido a las consideraciones expuestas en el inciso 4.3.1.2. Elaboración del archivo de caudales con flujo permanente. En la condición de frontera aguas arriba se utilizó el hidrograma de caudales diarios de la estación LM45. Para tener en cuenta los afluentes que llegan a los tramos en estudio, se ingresaron como hidrogramas laterales los caudales diarios que aportan estos tributarios. En la Tabla 6 se indican las secciones en las que se ingresaron los hidrogramas de la condición de frontera aguas arriba y los hidrogramas laterales.

Tabla 6. Ubicación de los afluentes en las secciones de la condición actual

Punto	Condición actual
	Station
Punto Inicial	9873
Punto entrega caño Piedras	8214.74*
Punto entrega caño NN	7570.00*
Punto entrega caño Melánquez	6016.50*

Fuente: adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En la Figura 38 se presentan las condiciones de frontera hidráulicas definidas para el archivo de flujo cuasi-no permanente de la condición actual.

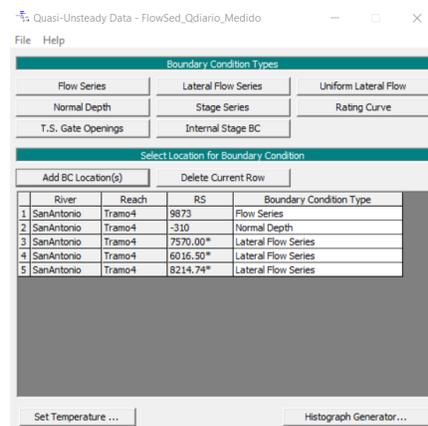


Figura 38. Condiciones hidráulicas de frontera aguas arriba y aguas abajo del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio. Modelo en HEC-RAS para la condición actual. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Con base en los registros de temperatura disponibles en la zona minera, se definió un valor medio de 26 °C para el dato de temperatura del agua.

4.3.2.2. *Elaboración del archivo de sedimentos*

4.3.2.2.1. *Condiciones iniciales y parámetros de transporte*

(Initial Conditions and Transport Parameters)

Para definir el volumen de control de sedimentos que se pueden erosionar, se definió una máxima profundidad de erosión de 10 m y las bancas que delimitan el cauce principal como límites del lecho móvil.

En la granulometría del material del lecho se utilizaron las curvas granulométricas obtenidas de las muestras que se tomaron sobre el realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio (Anexo 1. **Información de campo**). En la Figura 39 se presentan las curvas granulométricas del material del lecho y en la Tabla 7 las secciones de la condición actual en las que se asignó cada curva granulométrica.

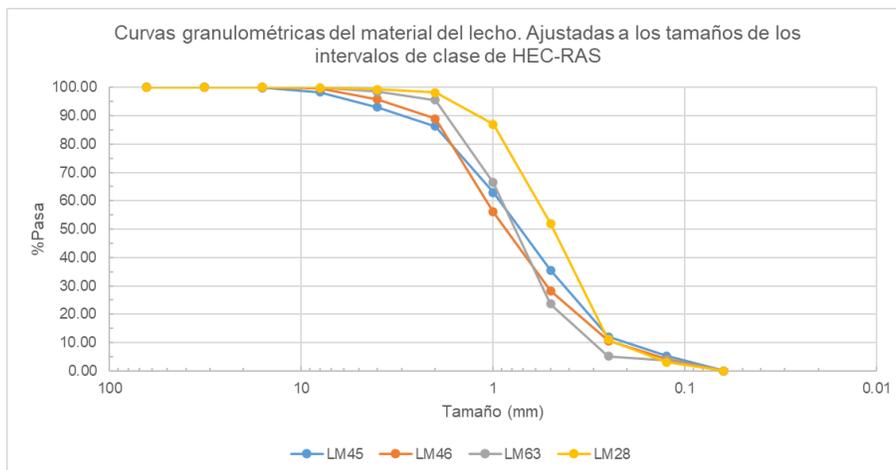


Figura 39. Granulometría del material del lecho del canal de realineamiento No. 4 y del cauce natural del arroyo San Antonio. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Tabla 7. Curvas granulométricas del material del lecho asignadas a las secciones transversales de la condición actual

Curva granulométrica	Condición actual
	Station
LM45	9873
LM46	3047
LM63	1423
LM28	193

Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

El modelo de transporte de sedimentos permite utilizar varias ecuaciones como función de transporte, acorazamiento del lecho y método de la estimación de la velocidad de caída de las partículas. Como función de transporte y como método de estimación de velocidad de caída se seleccionó la ecuación de Toffaleti, que es una ecuación de carga total aplicable en ríos con partículas del tamaño de arena. El método de acorazamiento seleccionado es “Thomas (Ex5)”, el cual utiliza un modelo de lecho de tres capas, que forma una capa de acorazamiento independiente que limita la erosión de las capas más profundas (U.S. Army Corps of Engineers, 2016b).

4.3.2.2.2. *Boundary Conditions (Condiciones de frontera)*

Para la condición de frontera aguas arriba se definió una curva de calibración que relaciona el caudal líquido con el caudal sólido transportado mediante una función potencial. También se incluye la respectiva granulometría del sedimento transportado para cada caudal líquido. En el proceso de mantenimiento del modelo de transporte de sedimentos, la curva de calibración utilizada se debe ajustar con base en la nueva información de las campañas de aforos sólidos y líquidos que se vayan realizando (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022). La información disponible sólo permitió disponer de un único dato, en la Figura 40 se presenta la información de la curva de calibración utilizada.

Number of flow-load points		1 sets
	Flow (m3/s)	6.52
	Total Load (tonnes/day)	76.96
1	Clay (0.002-0.004)	2.56
2	VFM (0.004-0.008)	5.13
3	FM (0.008-0.016)	10.26
4	MM (0.016-0.032)	20.51
5	CM (0.032-0.0625)	39.1
6	VFS (0.0625-0.125)	14.77
7	FS (0.125-0.25)	0.54
8	MS (0.25-0.5)	3.36
9	CS (0.5-1)	2.87
10	VCS (1-2)	0.81
11	VFG (2-4)	0.07
12	FG (4-8)	0.03
13	MG (8-16)	
14	CG (16-32)	
15	VCG (32-64)	
16	SC (64-128)	

Define Diversion Load
 Load
 Concentration
Conc<-->Load
Plot ...
OK
Cancel

Figura 40. Datos de la curva de calibración caudales líquidos - caudales sólidos. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Los caudales de los afluentes que llegan al realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio son muy bajos; por lo tanto, su capacidad de transporte de sedimentos es limitada. Esta consideración permitió simplificar el modelo, asumiendo que el agua que aportan los afluentes está libre de sedimentos (agua clara). Esta consideración se tiene en cuenta en el modelo al no definirle condición de frontera de sedimentos a las secciones que tienen asociadas un hidrograma de flujo lateral.

4.3.2.2.3. Opciones de cambio en el lecho (Bed Change Options)

Por defecto, el modelo en HEC-RAS sólo permite erosión y sedimentación dentro de los límites del lecho móvil; sin embargo, lo más adecuado es permitir que se produzca sedimentación en las llanuras de inundación. Se cambió la configuración y se escogió el método Veener para permitir la deposición de sedimentos en esta llanura.

En la Figura 41 se muestran las opciones de cambio del lecho del modelo de la condición actual.

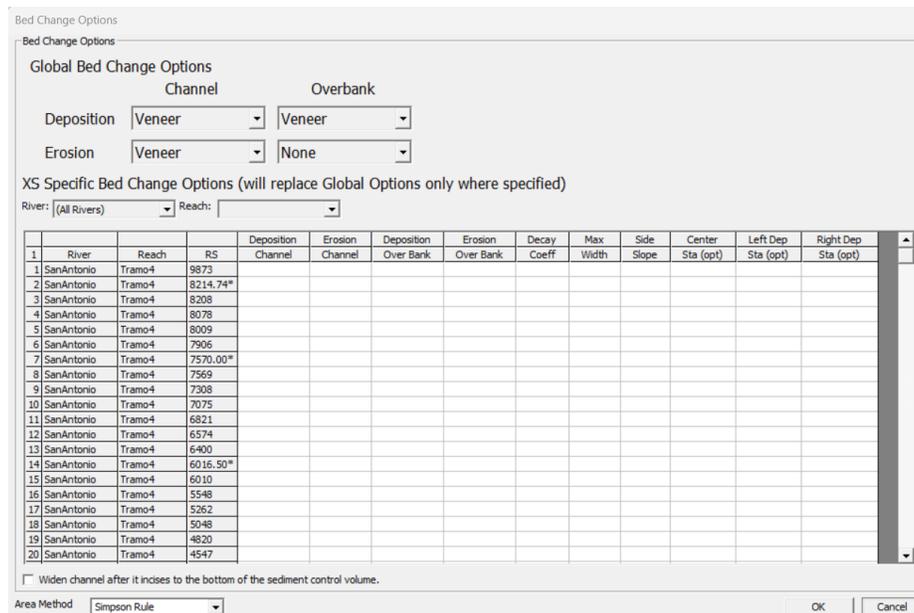


Figura 41. Opciones del cambio del lecho del modelo de la condición actual. Fuente: Adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

4.3.2.3. Ejecución del plan de transporte de sedimentos

En la creación del plan de transporte se escoge el archivo de geometría, de caudales y de sedimentos que se van a utilizar para la ejecución. En la Figura 42 se presenta el plan de transporte de sedimentos del modelo de la condición actual. La simulación se realizó con una ventana de tiempo de 10 años.

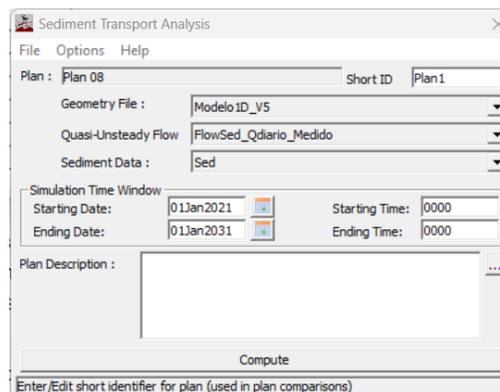


Figura 42. Plan de transporte de sedimentos del modelo de la condición actual. Fuente: Adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Como nivel de salida de los resultados se escogió el *Output Level 5*, debido a que muestra las variables requeridas para los análisis. Se definió que los resultados del análisis de transporte de sedimentos se mostraran en unidades de masa, debido a que la información de los caudales sólidos tomada en campo está en unidades de toneladas/día.

4.3.2.4. Calibración del modelo de transporte de sedimentos

Un modelo de transporte de sedimentos se puede calibrar ajustando la curva de calibración de caudales líquidos y sólidos, medida en la sección transversal aguas abajo del modelo con la curva de calibración simulada. La información disponible para realizar la calibración es muy limitada, por lo que no es posible realizar una calibración detallada del modelo de transporte de sedimentos (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

De los tres aforos sólidos realizados en campo, solamente se pudieron utilizar los caudales sólidos determinados en los últimos dos aforos, debido a las condiciones en campo. Con base en la información que se vaya recopilando, es necesario calibrar permanentemente el modelo (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

Generalmente, las curvas de calibración de caudales sólidos y líquidos pueden aproximarse a una función potencial, como se muestra en la Ecuación 33, en donde Q_s es el caudal sólido y Q_l es el caudal líquido.

$$Q_s = aQ_l^b$$

Ecuación 33. Ecuación de una curva de calibración de caudales líquidos y sólidos.

La calibración del modelo de transporte de sedimentos de la condición actual se hizo comparando el valor del coeficiente a y el exponente b de la curva obtenida en la estación LM28, con base en los datos de los aforos líquidos y sólidos realizados en campo (Tabla 5), y con los valores de a y b de la curva elaborada con los caudales simulados en la sección 193 del modelo, la cual es la sección más cercana a la ubicación de esta estación.

La simulación se hizo utilizando ecuaciones de transporte de sedimentos aplicables al caso de estudio, es decir, las que calcularan el transporte total en ríos con materiales en el lecho del tamaño de arenas y gravas. Las ecuaciones utilizadas fueron Toffaleti, Laursen-Copeland y Ackers-White. En la Figura 43 se muestran los datos de los caudales sólidos y líquidos medidos y simulados en la estación LM28. En la Tabla 8 aparecen los valores del coeficiente a y el exponente b obtenidos para las ecuaciones de las curvas de calibración de cada simulación.

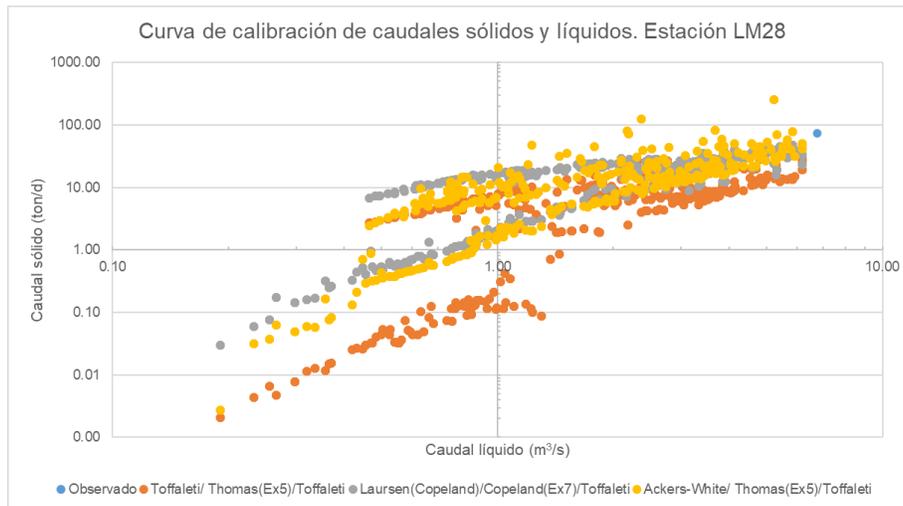


Figura 43. Curva de calibración de caudales sólidos y líquidos. Estación LM28. Fuente: adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Tabla 8. Resultados de la calibración del modelo de transporte de sedimentos de la condición actual

Ecuación	a	b	Δa	Δb
Observado	0.5966	2.5246	-	-
Toffaleti	0.9309	1.9359	56%	-23%
Laursen-Copeland	4.1309	1.2338	592%	-51%
Ackers-White	2.9731	1.6612	398%	-34%

Fuente: Adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

La curva de calibración obtenida de la simulación utilizando la ecuación de Toffaleti es la que presenta el menor error con los parámetros a y b obtenidos de la curva construida con los datos medidos.

4.4. Modelo de la condición futura

Después de calibrar el modelo de la condición actual es posible elaborar el modelo de la condición futura, asumiendo que los parámetros calibrados anteriormente serán iguales en esta nueva condición.

En este apartado se explica el proceso de elaboración del modelo hidráulico y de transporte de sedimentos de la condición futura, que corresponde a un modelo integrado en el que se simuló el realineamiento definitivo del arroyo San Antonio; un tramo del realineamiento No. 4 aguas arriba del realineamiento definitivo, iniciando en las coordenadas 1067325.367E, 1544910.631N; un tramo del cauce natural abandonado del arroyo San Antonio aguas abajo del punto de entrega del realineamiento definitivo y un tramo del cauce natural activo del cauce natural del arroyo San Antonio, hasta las coordenadas 1060785.01E, 1546451.07 (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

4.4.1. Modelo hidráulico de la condición futura

4.4.1.1. *Elaboración del archivo de geometría*

La generación de la geometría del modelo en HEC-RAS de la condición futura se realizó a partir de un modelo de terreno utilizando las curvas de nivel tomadas del plan minero para las condiciones futuras, las superficies 3D del canal de realineamiento definitivo y los levantamientos batimétricos del cauce natural aguas abajo del punto de entrega del realineamiento definitivo. Al igual que en el modelo de la condición actual, las secciones transversales para el modelo hidráulico de la condición futura se generaron utilizando la herramientas RasMapper y ArcGIS, y el modelo de terreno elaborado anteriormente. En la Figura 44 se muestra la geometría en planta del modelo de la condición futura.

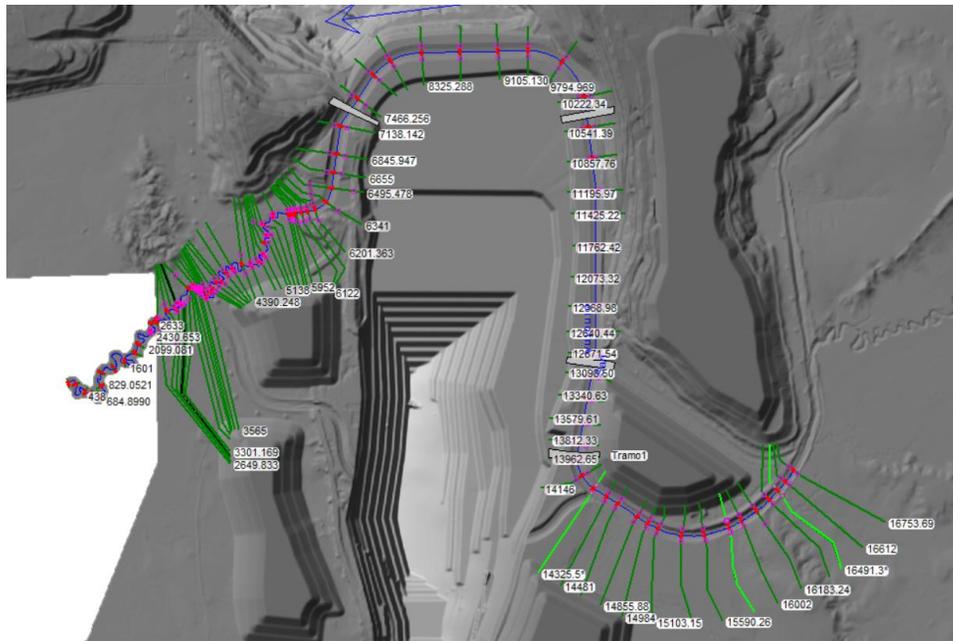


Figura 44. Topología y geometría del modelo hidráulico para la condición futura. Trazado en planta y secciones transversales Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Para definir los coeficientes de rugosidad de Manning se utilizó la superficie de coeficientes de Manning ajustada en la calibración del modelo de la condición actual, que se expuso en el inciso 4.3.1.3. Calibración del modelo hidráulico.

4.4.2. Modelo de transporte de sedimentos de la condición futura

4.4.2.1. *Elaboración del archivo de caudales con flujo cuasi no-permanente*

En el modelo de la condición futura se simuló los caudales definidos en el modelo de la condición actual (Figura 37), con el objetivo de analizar los cambios que se producirían en el sistema de la condición futura bajo las mismas condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera hidráulicas del modelo de la condición futura son las mismas que se definieron en el modelo de la condición actual. La profundidad normal se definió como condición de frontera aguas abajo y para aguas arriba se utilizó el hidrograma

de caudales diarios de la estación LM45. Para tener en cuenta los afluentes que llegan a los tramos en estudio se ingresaron los caudales diarios que aportan estos tributarios como hidrogramas laterales. En la Tabla 9 se indican las secciones en las que se ingresaron los hidrogramas de la condición de frontera aguas arriba y los hidrogramas laterales.

Tabla 9. Ubicación de los afluentes en las secciones de la condición futura

Punto	Condición futura
	Station
Punto Inicial	16754
Punto entrega caño Piedras	16491.3*
Punto entrega caño NN	15852.0*
Punto entrega caño Melánquez	14325.5*

Fuente: Adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En la Figura 45 se presentan las condiciones de frontera hidráulicas definidas para el archivo de flujo cuasi-no permanente de la condición futura.

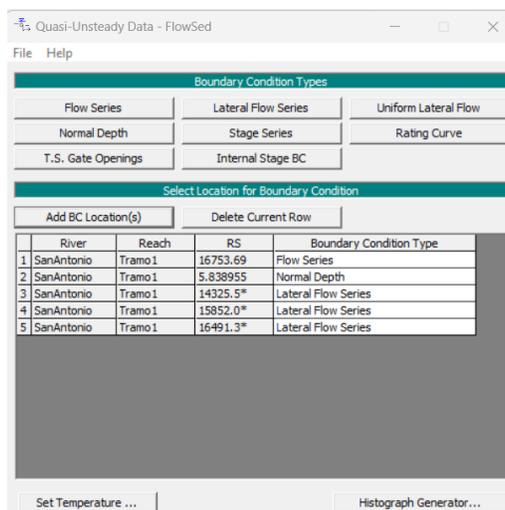


Figura 45. Condiciones hidráulicas de frontera aguas arriba y aguas abajo del realineamiento definitivo del arroyo San Antonio. Modelo en HEC-RAS para la condición futura. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Con base en los registros de temperatura disponibles en la zona minera, se definió un valor medio de 26 °C para el dato de la temperatura del agua.

4.4.2.2. Elaboración del archivo de sedimentos

4.4.2.2.1. Condiciones iniciales y parámetros de transporte

(Initial Conditions and Transport Parameters)

Para definir el volumen de control de sedimentos que se pueden erosionar, se definió una máxima profundidad de erosión de 10 m y las bancas que delimitan el cauce principal como límites del lecho móvil.

En la granulometría del material del lecho se utilizaron las curvas granulométricas que se muestran en la Figura 39. En la Tabla 10 se reseñan las secciones de la condición futura en las que se asignó cada curva granulométrica.

Tabla 10. Curvas granulométricas del material del lecho asignadas a las secciones transversales de la condición futura

Curva granulométrica	Condición futura
	Station
LM45	16754
LM46	11195.97
LM63	9794.969
LM28	3101

Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Como función de transporte y como método de estimación de velocidad de caída se seleccionó la ecuación de Toffaleti. Como método de acorazamiento se escogió Thomas (Ex5), debido a que esta fue la combinación definida en la calibración del modelo de transporte de sedimentos de la condición actual.

4.4.2.2.2. Boundary Conditions (Condiciones de frontera)

Para la condición de frontera aguas arriba se utilizó la curva de calibración que relaciona el caudal líquido con el caudal sólido que se empleó en el modelo de la condición actual, con la respectiva granulometría del sedimento transportado para cada caudal líquido (Figura 40).

Los caudales de los afluentes que llegan al realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio son muy bajos; por lo tanto, su capacidad de transporte de sedimentos es limitada. Esta consideración permitió simplificar el modelo asumiendo que el agua que aportan los afluentes está libre de sedimentos (agua clara). Esta consideración se tiene en cuenta en el modelo al no definirle condición de frontera de sedimentos a las secciones que tienen asociadas un hidrograma de flujo lateral.

4.4.2.2.3. Opciones de cambio en el lecho (*Bed Change Options*)

En el modelo de la condición futura también se cambió la configuración y se escogió el método Veener para permitir la deposición de sedimentos en la llanura de inundación.

4.4.2.3. Ejecución del plan de transporte de sedimentos

En la Figura 46 se muestra el plan de transporte de sedimentos del modelo de la condición futura. La simulación se realizó con una ventana de tiempo de 10 años.

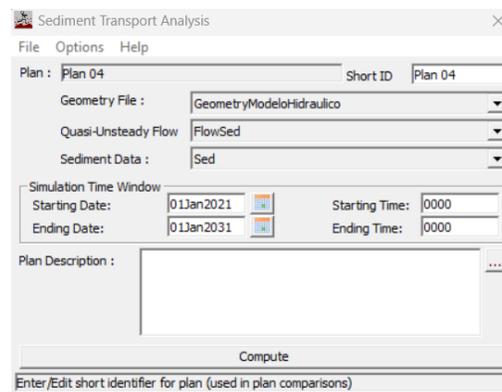


Figura 46. Plan de transporte de sedimentos del modelo de la condición futura. Fuente: Adaptado de Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Como nivel de salida de los resultados se escogió el *Output Level 5* para obtener los resultados en el mismo formato que los del modelo de la condición actual.

4.5. Resultados de las modelaciones

En este apartado se presentan los resultados y análisis del modelo de transporte de sedimentos de la condición actual y de la condición futura. Con el fin de analizar la evolución de los cambios en el perfil longitudinal y las secciones transversales se extrajeron los resultados de los modelos para uno, cinco y diez años de la simulación (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

4.5.1. Perfil longitudinal

En la Figura 47 se muestra la elevación del fondo del canal para la condición actual y para la condición futura. En ambos casos se aprecia la forma como el sistema busca su pendiente de equilibrio, mediante procesos de erosión y sedimentación.

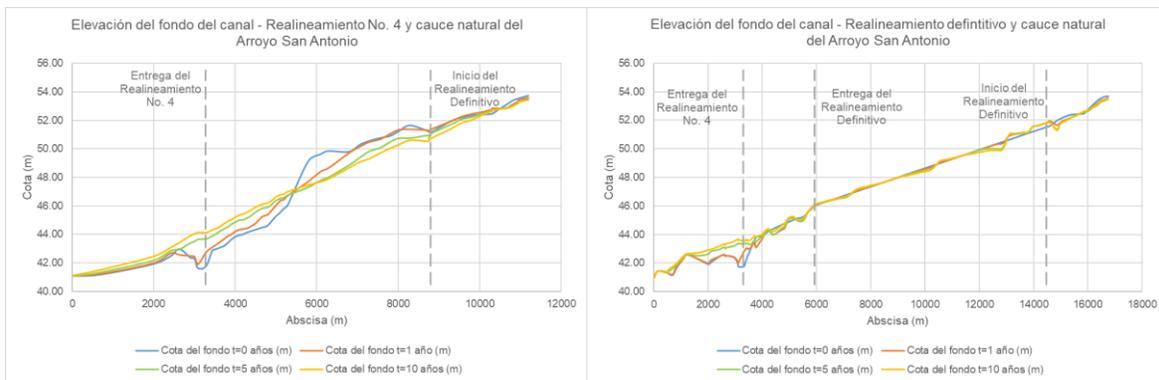


Figura 47. Elevación del fondo del canal. Condición actual y condición futura. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En la Figura 48 se aprecia el cambio relativo en las cotas del fondo del canal para la condición actual y para la condición futura. En la condición actual, el sistema tiende a erosionar el fondo del cauce en el tramo inicial del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio y a depositar los sedimentos en el tramo final, para obtener la pendiente de equilibrio del sistema. En la condición futura la pendiente con la que fue diseñada el realineamiento definitivo de este arroyo es más cercana a la pendiente de equilibrio del cauce, por lo que se esperaría, con base en las modelaciones, que la magnitud de los procesos de sedimentación y erosión sea menor.

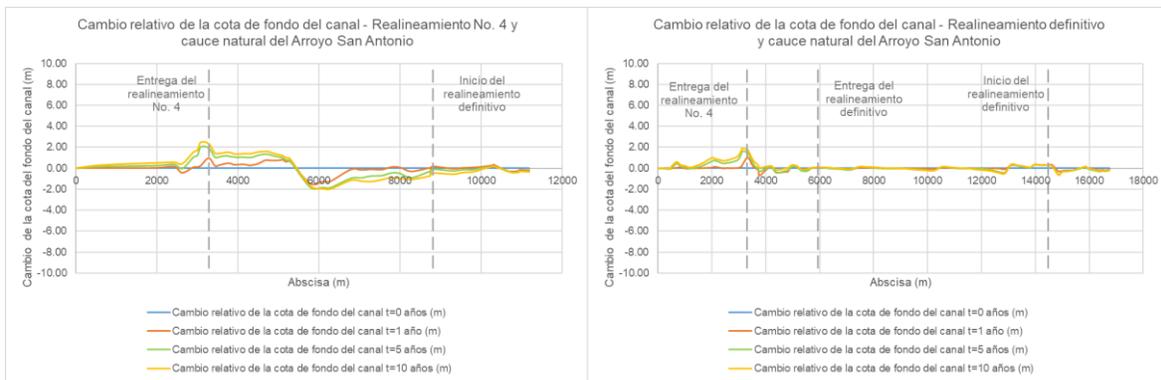


Figura 48. Cambio relativo de la cota del fondo del canal. Condición actual y condición futura. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En la Figura 49 se muestra el cambio en masa del material del lecho a lo largo del cauce. La lectura de estas gráficas debe hacerse de derecha a izquierda. Si la pendiente de la gráfica es negativa significa que el tramo se está erosionando, y en el caso contrario, si la pendiente es positiva significa que se está sedimentando. El corte de las curvas con el eje vertical representa el cambio total en masa del tramo en estudio.

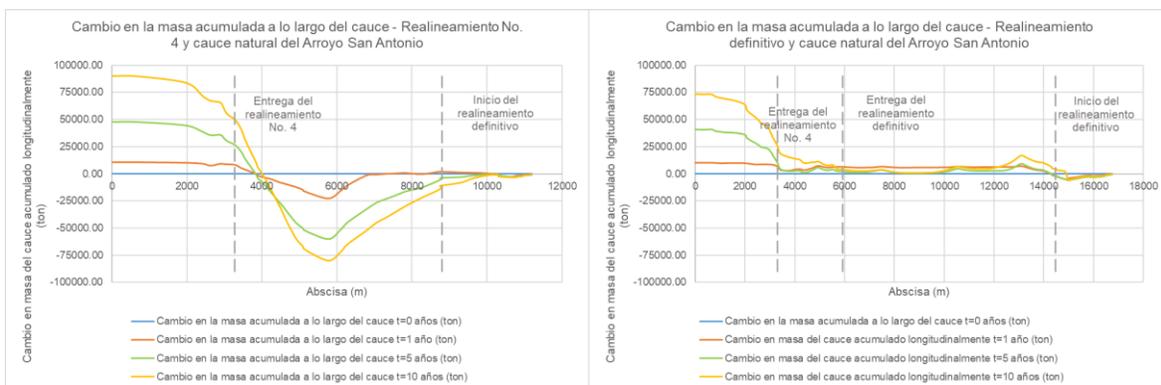


Figura 49. Cambio en la masa del lecho acumulada a lo largo del cauce (lectura de derecha a izquierda). Condición actual y condición futura. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

Con base en los resultados y análisis de las figuras 47, 48 y 49, los patrones de los procesos de sedimentación y erosión en la condición actual y la condición futura son similares, aguas arriba el cauce se erosiona y aguas abajo tiende a sedimentarse. La pendiente longitudinal del cauce de la condición futura, es decir, del realineamiento

definitivo del arroyo San Antonio es muy similar a la pendiente de equilibrio dinámico del cauce (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

4.5.2. Secciones transversales

Con el objetivo de analizar los posibles cambios producidos por el realineamiento definitivo del arroyo San Antonio se compararon los resultados obtenidos en los tramos coincidentes de los modelos de la condición actual y de la condición futura. Se compararon tres secciones aguas arriba de la intervención y cinco secciones aguas abajo (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022) (Figura 50).

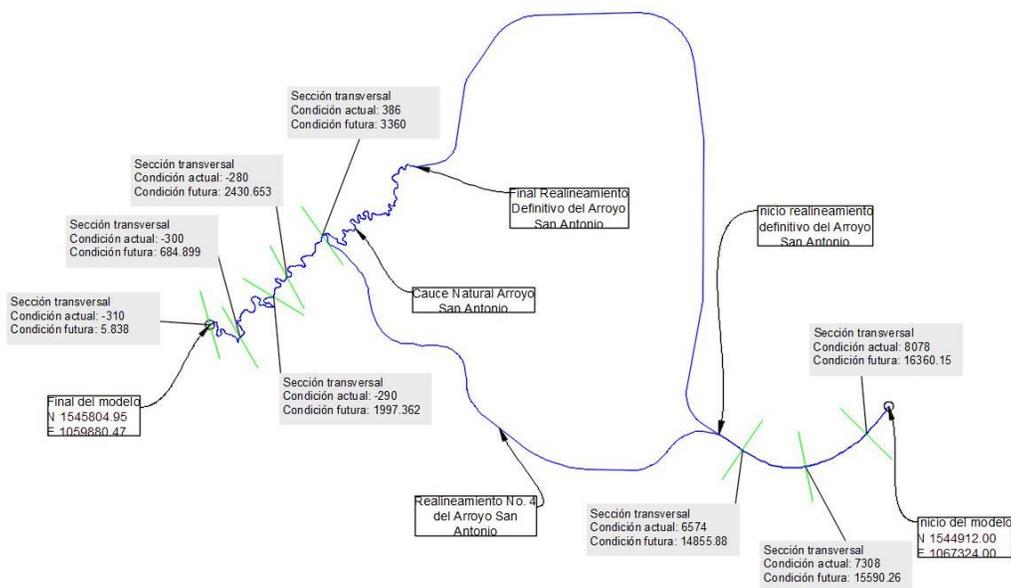


Figura 50. Secciones transversales analizadas aguas arriba y aguas abajo de la intervención. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En la Tabla 11 se presentan los cambios relativos en la cota del fondo del canal obtenidos de las simulaciones realizadas para la condición actual y para la condición futura. Un cambio negativo significa que se presentó erosión en el cauce principal y un cambio con signo positivo indica sedimentación.

Tabla 11. Cambio relativo de la cota del fondo del canal para 1, 5 y 10 años de la simulación. Condición actual y condición futura.

Ubicación	Nombre de la sección Condición actual	Nombre de la sección Condición futura	Cambio relativo de la cota del fondo del canal (m)					
			Condición actual			Condición futura		
			t = 1 año	t = 5 años	t = 10 años	t = 1 año	t = 5 años	t = 10 años
Aguas arriba de la intervención	8078	16360.15	-0.30	-0.37	-0.42	-0.17	-0.29	-0.26
	7308	15590.26	0.16	0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.06
	6574	14855.88	-0.03	-0.24	-0.55	-0.29	-0.58	-0.66
Aguas abajo de la intervención	386	3360	0.96	1.93	2.36	0.93	1.37	1.60
	-280	2430.65	0.18	0.39	0.59	-0.01	0.48	0.72
	-290	1997.36	0.04	0.27	0.53	0.07	0.70	1.01
	-300	684.90	0.03	0.18	0.33	0.06	0.46	0.61
	-310	5.84	0.01	0.02	0.04	0.00	-0.01	0.01

Fuente: (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022)

Se observa que, en general, tanto para la condición actual como para la condición futura, las secciones transversales presentan pequeños cambios, debido a la sedimentación y erosión propios de la dinámica del sistema. Las secciones 386 (condición actual) y 3360 (condición futura) corresponden a la ubicación de la entrega del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio al cauce natural. En esta zona se presentan mayores procesos de sedimentación, debido a que la dinámica del río busca generar su pendiente de equilibrio. La ubicación de estas secciones en el perfil longitudinal del cauce se presenta en la Figura 51.

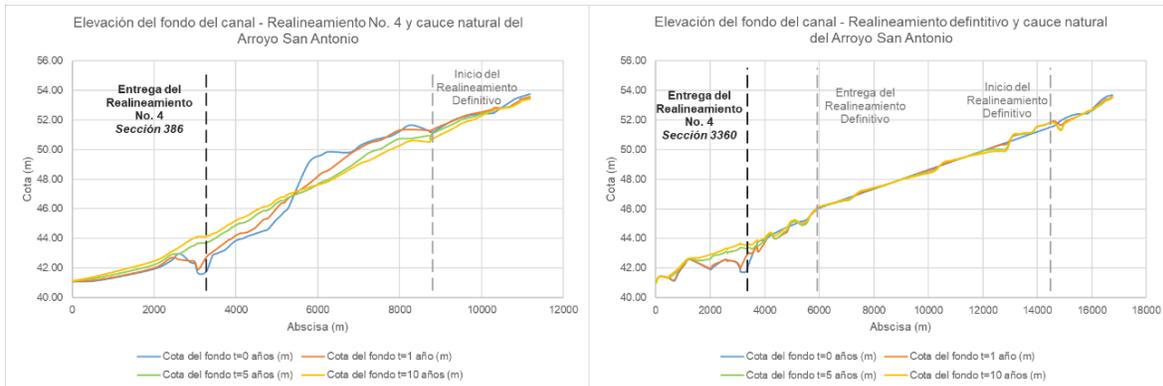


Figura 51. Cambio relativo de la cota del fondo del canal. Ubicación de la entrega del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio al cauce natural para la condición actual y condición futura. Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En la Figura 52 se muestran las secciones transversales del tramo aguas arriba del inicio del realineamiento definitivo del arroyo San Antonio. En la Figura 53 se muestran las secciones aguas abajo de donde actualmente entrega el realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio, sobre el cauce natural (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022).

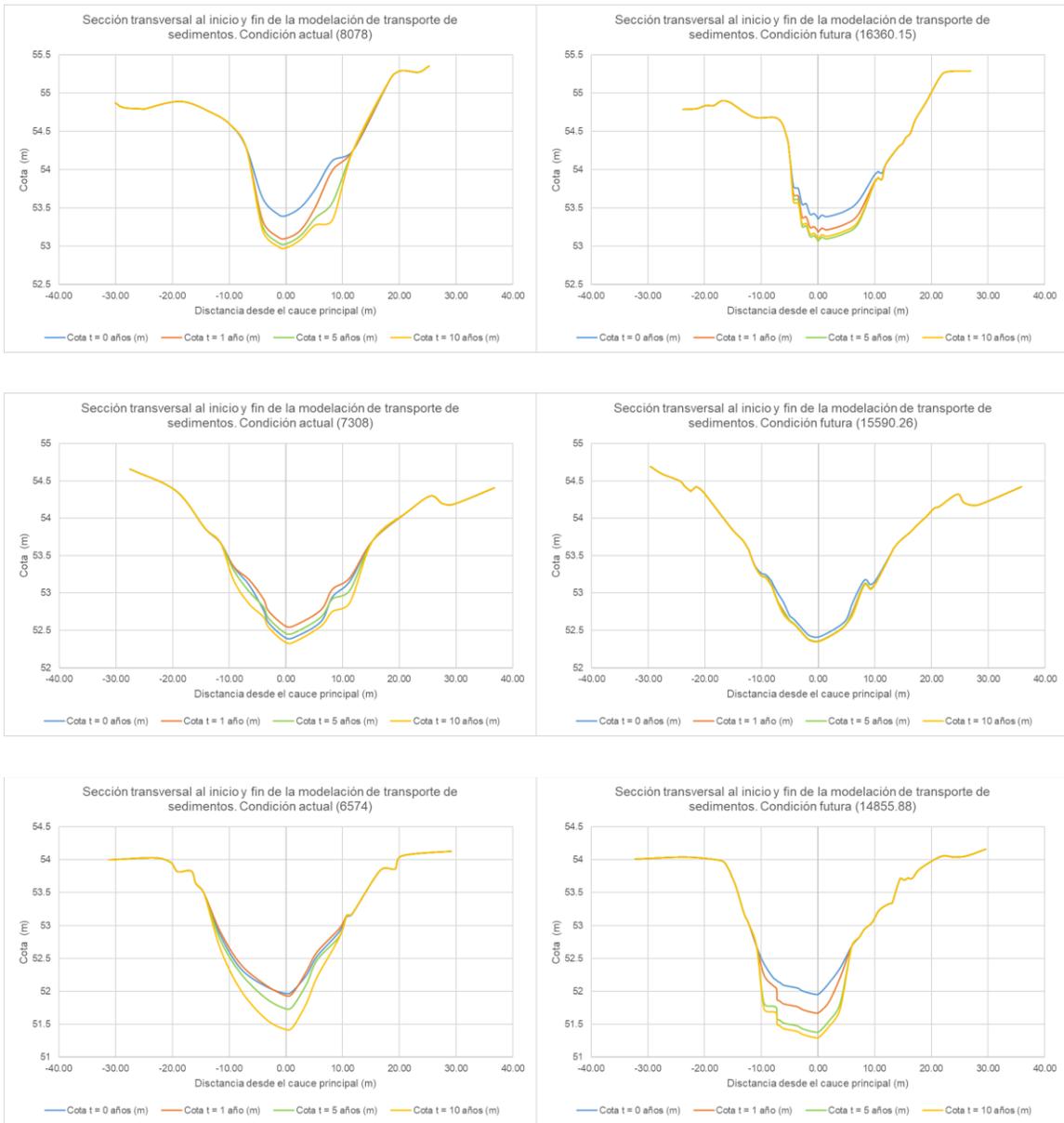
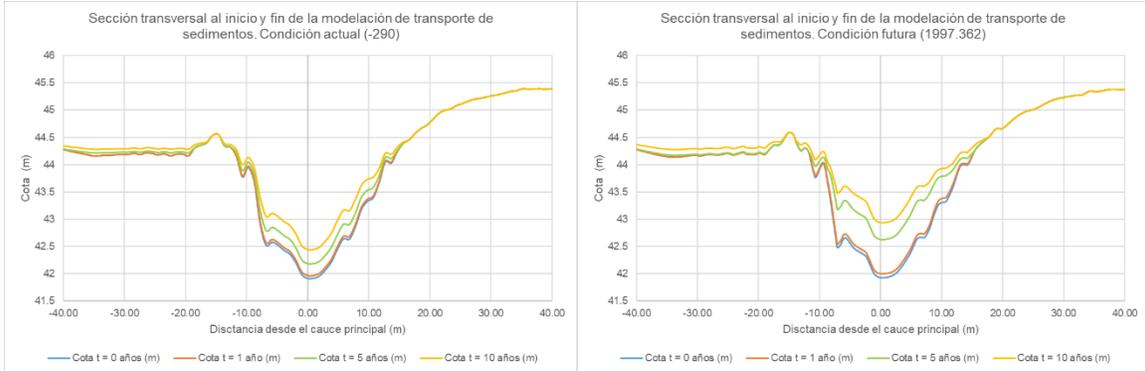
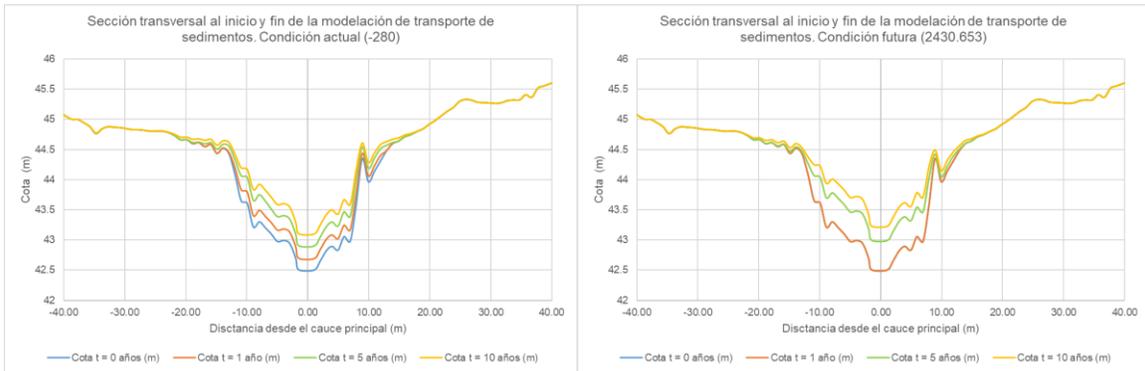
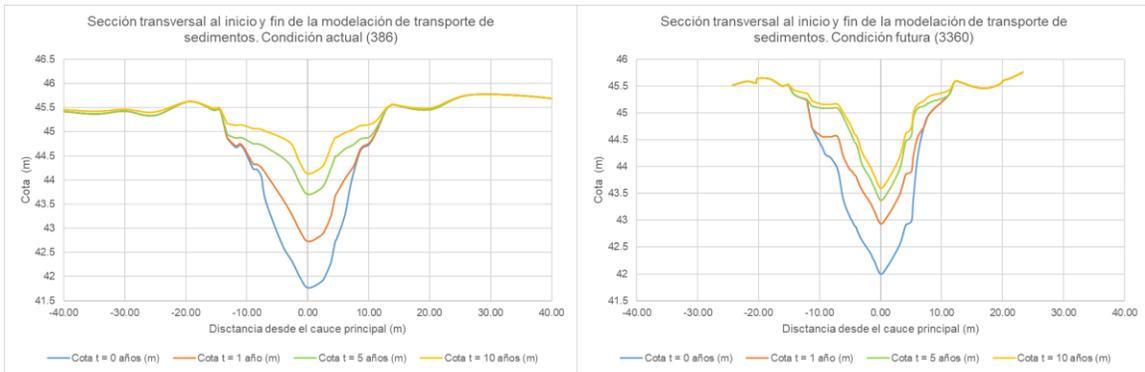


Figura 52. Secciones transversales aguas arriba de la intervención. Condición actual y condición futura.
Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.



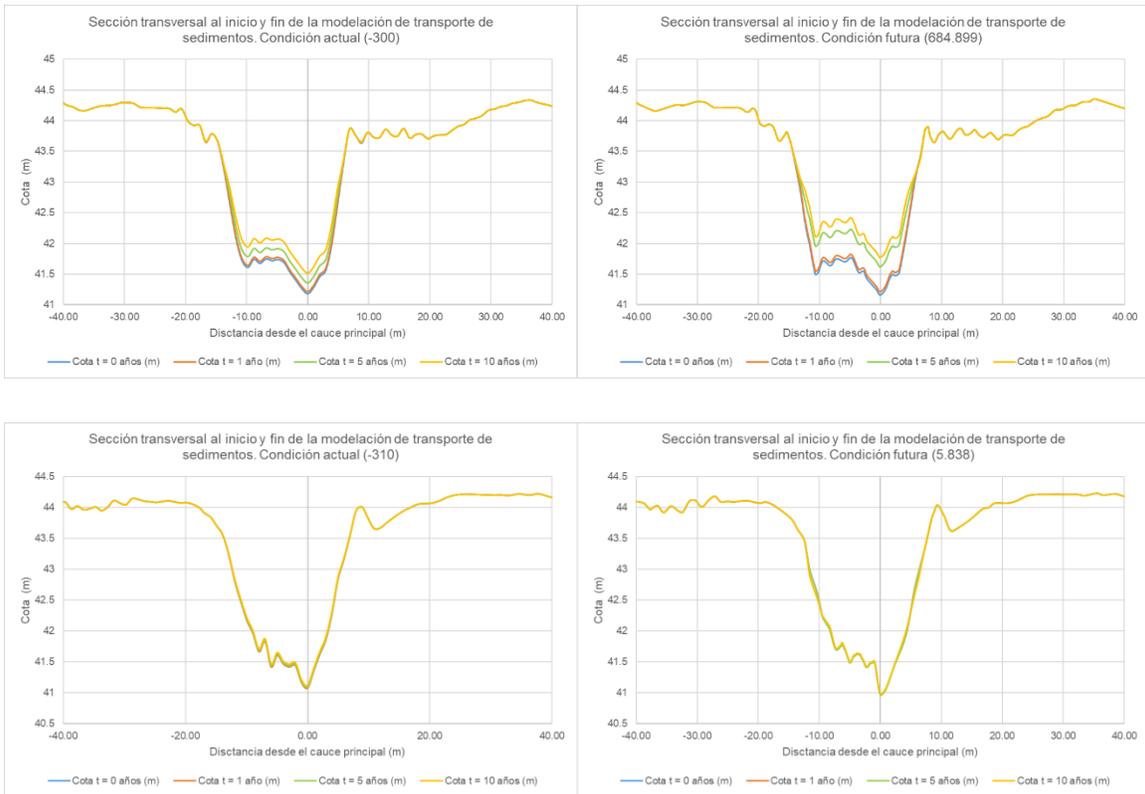


Figura 53. Secciones transversales aguas abajo de la intervención. Condición actual y condición futura.
Fuente: Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022.

En general, los resultados obtenidos muestran que los cambios en las secciones transversales que ocurrirían en la condición futura son similares a los que se producirían si la condición actual se mantuviera en operación. Sin embargo, es necesario realizar un monitoreo permanente con el fin de ajustar el modelo y ejecutar el mantenimiento del cauce del realineamiento definitivo del arroyo San Antonio.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

El “Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua”, publicado por el IDEAM es el documento técnico que sirve como guía para realizar los aforos líquidos y sólidos en cauces aluviales en Colombia. Adicionalmente, los “Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico”, publicado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, presentan una recomendación general de los contenidos mínimos que debe tener el análisis de sedimentos a escala de cuenca. Sin embargo, en estos documentos no se detalla la forma como se deben realizar los análisis de sedimentos cuando se quiere evaluar en un tramo el transporte de sedimentos y la erosión o depositación generada.

En este documento se presentó una guía metodológica para la elaboración de un modelo de transporte de sedimentos a escala de tramo, con el objetivo de utilizar los resultados de las simulaciones para definir modelos de gestión para la toma de decisiones.

Para elaborar el modelo de transporte de sedimentos es necesario conocer en detalle la información de campo disponible. Generalmente, la información de aforos sólidos del material transportado es muy limitada, por lo que es necesario adoptar alguna estrategia para completarla. Cuando se tiene en cuenta el caudal sólido total medido que ingresa al sistema es posible construir una curva de calibración de caudales sólidos vs. caudales líquidos para la condición de frontera de transporte de sedimentos, que es una de las condiciones más utilizadas en este tipo de análisis. Adicionalmente, para cada caudal sólido medido es necesario construir una curva granulométrica compuesta que represente la granulometría del material transportado por arrastre y la granulometría del material en suspensión.

Antes de elaborar el modelo de transporte de sedimentos se debe tener un modelo hidráulico preciso, calibrado y estable para evitar ampliar errores en el modelo de transporte de sedimentos. La variable que se puede modificar para ajustar los valores simulados en el modelo hidráulico es el coeficiente de rugosidad de Manning. Dependiendo de las características del sistema, es importante definir si el modelo de transporte de sedimentos se realizará con el enfoque de flujo cuasi-no permanente o con flujo no permanente.

Los resultados de las simulaciones de transporte de sedimentos son muy sensibles a la función de transporte escogida, ya que son ecuaciones empíricas desarrolladas para condiciones particulares, por lo que se deben tener en cuenta para utilizar la que mejor se adapte a las características del sistema en estudio.

Con el modelo de transporte de sedimentos se simulan los caudales que se esperan que circulen en el cauce para estimar los cambios en su perfil y sus secciones transversales. En general, se pueden obtener los siguientes resultados que permitirían analizar la evolución del cauce (Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2022):

- **Sedimentación:** en los tramos simulados en los que se presente sedimentación del cauce es posible la gestión de campañas de mantenimiento y limpieza.
- **Erosión:** en los tramos simulados en los que se presenten procesos de erosión del lecho importantes, que puedan afectar la integridad del canal, es posible considerar la implementación de obras de protección de orillas y de fondo.
- **Equilibrio:** esta es la situación a la que eventualmente se espera que llegue el río, en la que los procesos de erosión y sedimentación encuentren un equilibrio dinámico, de tal forma que no se presenten cambios significativos en las secciones transversales y en el perfil. En esta situación no es necesario realizar intervenciones en el cauce.

A partir de la guía metodológica presentada se elaboraron dos modelos de transporte de sedimentos que evalúan la condición actual y la condición futura de un tramo del arroyo San Antonio, ubicado en la zona del proyecto minero La Loma en el departamento del Cesar, Colombia. Debido a las condiciones de la operación minera en la cuenca de este arroyo, se diseñó un canal de realineamiento definitivo para mantener la dinámica hidráulica y de transporte de sedimentos similar a las condiciones existentes. Para analizar este comportamiento se elaboró y calibró un modelo hidráulico y de transporte de sedimentos para la condición actual. A partir de los parámetros ajustados en la calibración se elaboró un modelo de transporte de sedimentos para la condición futura, teniendo en cuenta que para esta última condición no existe información disponible.

El modelo hidráulico de la condición actual se calibró utilizando la información disponible correspondiente a un mapa de coeficientes de Manning. Se obtuvo que un factor de multiplicación de 1,4 para los valores de n de referencia reporta el mínimo error entre los niveles de la superficie libre medidos y simulados. El modelo de transporte de sedimentos se calibró comparando la curva de calibración de caudales sólidos y líquidos simulada en la sección 193 con la curva de calibración obtenida de las mediciones realizadas en la estación LM28. Las comparaciones se realizaron utilizando las ecuaciones de Toffaleti, Laursen-Copeland y Ackers-White. Se estableció que la ecuación de Toffaleti se ajustaba mejor a las características del sistema, por lo cual se decidió realizar los análisis con esta ecuación.

En general, los resultados obtenidos de las modelaciones para la condición futura muestran que los cambios que ocurrirían aguas abajo de la entrega del realineamiento definitivo son muy similares a los que ocurrirían aguas abajo del realineamiento No. 4 del arroyo San Antonio, que corresponde a la condición actual. En ambas condiciones el sistema tiende a erosionar el cauce aguas arriba y a depositar los sedimentos en el tramo final, para obtener una pendiente de equilibrio constante en este tramo analizado del sistema. Sin embargo, los resultados de las simulaciones muestran que en la condición futura la magnitud de los procesos de sedimentación y erosión serían menores.

Es necesario que el modelo de transporte de sedimentos se actualice constantemente con base en la nueva información de campo disponible. Así mismo, que en el realineamiento definitivo del arroyo San Antonio se realicen permanentemente campañas de aforo de caudales líquidos y sólidos, y levantamientos topobatimétricos que permitan tener un registro de la evolución histórica del cauce. Una vez construido el canal, el modelo de transporte de sedimentos de la condición futura permitirá realizar simulaciones para analizar la evolución del cauce y tomar decisiones con base en los resultados.

Referencias

- Agrimensores, C. de. (2008). *Capítulo 3. Introducción al HEC-RAS. Limitaciones del modelo.* 1–16.
- Australian Water School. (2019). *Sediment transport modelling. Too hard for Einstein?*
- Benayas Polo, R. (2015). *What is HEC-RAS and what is it useful for?*
<https://www.giscourse.com/what-is-hec-ras-and-what-is-it-useful-for/>
- Bernard, J. M., & Tuttle, R. W. (1998). Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices. In *Engineering Approaches to Ecosystem Restoration* (Issue 0120).
[https://doi.org/10.1061/40382\(1998\)55](https://doi.org/10.1061/40382(1998)55)
- Brils, J. (2008). Sediment monitoring and the European Water Framework Directive. *Annali Dell'Istituto Superiore Di Sanita*, 44(3), 218–223.
- Calderón Colorado, A. (2021). *Transporte de Sedimentos Aguas Abajo de la Implantación de Estructuras en el Lecho de un Río. Nuevo Puento Pumarejo, Barranquilla – Colombia.* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (2022). *Proyecto Minero - La Loma. Realineamiento Definitivo Arroyo San Antonio. Informe Principal de Hidráulica.*
- Chevalier, G. G., Locatelli, F., Masson, E., & Blanpain, O. (2021). Silting in the Grand Canal in the Domain of Chantilly (Oise, France). *Water (Switzerland)*, 12, 1–22.
- Dahl, T. A., Heath, R. E., Gibson, S. A., & Nygaard, C. J. (2018). *HEC-RAS Unsteady Flow and Sediment Model of the Mississippi River: Tarbert Landing to the Gulf.* 25, 82.
<https://doi.org/10.21079/11681/31782>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (n.d.). *Capítulo 5 - Transporte de sedimentos.*
<https://www.fao.org/3/t0848s/t0848s07.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United States (FAO). (n.d.). *Capítulo 5 - Transporte de sedimentos.* <https://www.fao.org/3/t0848s/t0848s07.htm>

- Gibson, S. (2019). *Intro HEC-RAS Sediment Demo (Part 2 of 3 - Sediment Transport Data)*.
<https://www.youtube.com/watch?v=9YiL3Men9as&t=515s>
- González Parra, J. D., & Moreno Barco, D. M. (2022). *Lineamientos generales para el manejo de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica en el marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- HEC RAS. (2016). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center, February, 547.
- Horvat, M., & Horvat, Z. (2020). Long term sediment transport simulation of the Danube , Sava , and Tisa rivers. *International Journal of Sediment Research*, i(xxxx).
<https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.03.014>
- Horvat, Z., Horvat, M., Koch, D., & Majer, F. (2021). Field measurements on alluvial watercourses in light of numerical modeling: case studies on the Danube River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08751-y>
- Hummel, R., Duan, J. G., & Zhang, S. (2012). Comparison of Unsteady and Quasi-Unsteady Flow Models in Simulating Sediment Transport in an Ephemeral Arizona Stream. *Journal of the American Water Resources Association*, 48(5), 987–998.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2012.00663.x>
- Hydro, M. (2012). *MIKE HYDRO River User Guide*. 1.
- Iber. (2014). *Manual de referencia hidráulico*. 1–17.
<http://www.jorgesanchez.net/web/css1.pdf>
- IDEAM. (2007). Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua: conocimiento hidrológico para el bienestar de la población. In *Bogotá DC: Acodal* (Vol. 214).
- IRTCES. (2015). *International Research and Training Centre on Erosion and Sedimentation*.
http://en.irtces.org/irtces/About/BackgroundChronology/A631201index_1.htm
- Joshi, N., Lamichhane, G. R., Rahaman, M. M., Kalra, A., & Ahmad, S. (2019). Application

of HEC-RAS to study the sediment transport characteristics of Maumee River in Ohio. *World Environmental and Water Resources Congress 2019: Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis - Selected Papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2019, December*, 257–267. <https://doi.org/10.1061/9780784482353.024>

Liu, C., Walling, D. E., & He, Y. (2017). Review: The International Sediment Initiative case studies of sediment problems in river basins and their management. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.05.005>

Martín Vide, J. P. (1997). *Ingeniería de ríos*. Universidad Politécnica de Cataluña.

Maza Álvarez, J., & García Flores, M. (1998). Capítulo 10. Transporte de sedimentos. In *Manual de Ingeniería de Ríos*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Ramirez, C. A., Bocanegra, R. A., & Sandoval, M. C. (2011). Modelación morfológica del río Cauca en el tramo La Balsa-Juanchito. *Ingeniería Y Competitividad*, 8(2), 80–93. <https://doi.org/10.25100/iyc.v8i2.2503>

Restrepo-López, J. C., Ortiz -Royero, J. C., Otero-Díaz, L., & Ospino-Ortiz, S. R. (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(153), 527. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.209>

Rodríguez Díaz, H. A. (2010). *Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones*. Socavación. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Tarar, Z. R., Ahmad, S. R., Ahmad, I., ul Hasson, S., Khan, Z. M., Washakh, R. M. A., Ateeq-Ur-Rehman, S., & Bui, M. D. (2019). Effect of sediment load boundary conditions in predicting sediment delta of Tarbela Reservoir in Pakistan. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081716>

Torres-Bejarano, F., González Martínez, J. A., Naranjo Saleme, M., & Cantero Martínez, J. (2022). Modelación del transporte de sedimentos en el Delta del río Sinú, Colombia.

Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 38, 25–40.
<https://doi.org/10.20937/rica.54337>

U.S. Army Corps of Engineers. (2016a). *HEC-RAS 1D Sediment Transport Technical Reference Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rassed1d/1d-sediment-transport-technical-reference-manual>

U.S. Army Corps of Engineers. (2016b). *HEC-RAS 1D Sediment Transport User 's Manual. Computer Manual*, 387.
<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rassed1d/1d-sediment-transport-user-s-manual>

UNESCO. (2011). *International Sediment Initiative*. 15.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)*. <https://www.epa.gov/ceam/environmental-fluid-dynamics-code-efdc>

Villalobos, G. G. (1996). Capítulo 8. Inicio de movimiento y acorazamiento. In *Manual de Ingeniería de Ríos*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Wieprecht, S., Haun, S., Weber, K., Noack, M., & Terheiden, K. (2016). *River Sedimentation: Proceedings of the 13th International Symposium on River Sedimentation (Stuttgart, Germany, 19-22 September, 2016)*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781315623207>

Yang, C. T. (1996). *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill.

Anexo 1. Información de campo

Anexo 2. Modelos HEC-RAS