

METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
EN EL RÍO TONA

MARLIN JOHANNA CRUZ URIBE
DAVID JESÚS HERRERA RICARDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2019

METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
EN EL RÍO TONA.

MARLIN JOHANNA CRUZ URIBE
DAVID JESÚS HERRERA RICARDO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

DIRECTOR
ANDRES ALMEYDA ORTIZ
Magister en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios, por ser mi luz y guiarme a alcanzar este logro, por ser mi fortaleza, mi camino, porque nunca me ha abandonado y por su gran misericordia.

A mis padres, Ismael y Blanca por su apoyo, su confianza, su buen ejemplo y su esfuerzo para brindarme lo mejor.

A Javier, mi amado esposo, por ser mi motivación y mi gran bendición, por su apoyo incondicional, comprensión y paciencia.

A Jennyfer, por ver en mí a una madre y por sentirse orgullosa de mí y de cada uno de mis triunfos, porque con su amor e inocencia me inspira a ser mejor.

A Dianna, mi eterna amiga, gracias por los buenos momentos, por las risas interminables, por los consejos, porque nunca me dejó sola y ahora que está junto a Dios en mi prevalece su cariño y su amistad será para siempre.

A nuestro director, Ing. Andrés Almeyda Ortiz por su colaboración en la elaboración de este proyecto, a los calificadores, los profesores Mario García solano y Edgar Ricardo Oviedo por compartir sus conocimientos.

A mis hermanas, Leiny y Yenny, mis sobrinos y demás familiares, a mis amigos Angie y Alex, a la señora Esperanza, el señor Marco, a los demás profesores, a mis compañeros de estudio y a todas las personas que han contribuido en mi formación académica y personal, ha sido muy valioso cada aporte en mi vida.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por permitirme ser parte de esta prestigiosa institución y por la educación recibida.

MARLIN JOHANNA CRUZ URIBE

AGRADECIMIENTOS

Agradezco A mis padres, Pedro y Martha por su apoyo, su confianza, su buen ejemplo y su esfuerzo para brindarme lo mejor en cada paso dado en esta carrera. A mis hermanos Dairo y Pedrito por su gran apoyo incondicional, por yo obtener este logro.

A mi Tía, Adelina que nunca dejo de ser un consejo y una pieza de apoyo motivacional para llegar a la meta.

Por ultimo a las amistades que siempre creyeron en este proyecto que se logró con dedicación y pude aprender mucho de cada uno de ellos, por todo lo anterior muchísimas gracias.

DAVID JESUS HERRERA RICARDO

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO DE REFERENCIA.....	20
3.1 MODELOS PARAMÉTRICOS.....	23
3.2 MODELO CONCEPTUALES	24
3.3 MODELOS FÍSICOS.....	24
4. METODOLOGÍA	26
4.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA.	26
4.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE JERARQUÍAS ANALÍTICAS (AHP).	27
4.3 GUÍA DEL MANEJO DEL PROGRAMA HEC-RAS 5.0.7.....	27
5. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y CRITERIOS DE SELECCIÓN	28
5.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	28
5.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	30
6. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN	36
6.1 TOPOLOGÍA DEL TERRENO.....	36
6.2 HIDROLOGÍA.....	38
6.2.1 Condición de frontera de la cota superior y flujos laterales.....	39
6.2.2 Configuración de caudales laterales	40

6.2.3 Definir la fecha de inicio.	41
6.2.4 Definir el número de datos.	42
6.2.5 Condición de frontera aguas abajo:	43
6.3 SEDIMENTOS	43
6.4 EJECUTAR CÁLCULOS	46
6.4.1 Nombrar el plan de simulación.....	46
6.4.2 Seleccionar la geometría de la cuenca.	46
6.4.3 Seleccionar los flujos de caudales históricos.	47
6.4.4 Seleccionar la especificación de los sedimentos.	47
6.4.5 Intervalo de tiempo.....	47
6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
7. PARÁMETROS REQUERIDOS POR EL MODELO HEC-RAS	50
8. CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA	54
ANEXOS	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Referencia de modelos utilizados en tesis de universidades colombianas	22
Tabla 2. Cantidad de artículos por país de origen de la publicación	27
Tabla 3. Modelos Conceptuales considerados en la evaluación.....	28
Tabla 4. Modelos Físicos considerados en la evaluación	29
Tabla 5. Criterios considerados en la evaluación de los modelos HEC-RAS y SWAT	30
Tabla 6. Pesos relativos para los criterios utilizados en la metodología AHP	32
Tabla 7. Matriz de ponderación de los criterios utilizados en el método AHP.....	33
Tabla 8. Asignación de juicios de valor a los modelos evaluados para cada criterio, método AHP.....	34
Tabla 9. Evaluación AHP de los modelo HEC-RAS y SWAT.....	35
Tabla 10. Factores de Manning para canales naturales	38
Tabla 11. Clasificación del tamaño de partícula en HEC-RAS, mm	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema jerárquico planteado	31
Figura 2. Curvas de nivel en la cuenca del río Tona	36
Figura 3. Secciones transversales creadas para ser exportadas a HEC-RAS.....	37
Figura 4. Secciones transversales en HEC-RAS 5.0.7	38
Figura 5. Ventana Quasi unsteady Flow editor, cota inicial y final	39
Figura 6. Condición de frontera “Flow Series” para cota superior	40
Figura 7. Editor de serie de flujos en cota superior	40
Figura 8. Caudales diarios en HEC-RAS	41
Figura 9. Configuración de la fecha de inicio	42
Figura 10. Número de datos hidrológicos	42
Figura 11. Datos hidrológicos hacia HEC-RAS.....	42
Figura 12. Condición de frontera aguas abajo	43
Figura 13. Ventana Sediment Data	44
Figura 14. Condiciones de frontera para el ingreso de sedimentos al sistema	45
Figura 15. Caracterización de los sedimentos que ingresan al sistema.....	46
Figura 16. Opción de visualización de resultados.....	48
Figura 17. Visualización de resultados.....	48
Figura 18. Diagrama de flujo para la configuración del modelo HEC-RAS 5.0.7 para la simulación del transporte de sedimentos	49

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MODELO PARAMÉTRICO PSIAC	60
---	----

RESUMEN

TITULO: METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RÍO TONA*.

AUTORES : Marlin Johanna Cruz Uribe
David Jesús Herrera Ricardo**

PALABRAS CLAVE: método, sedimentos, simulación, HEC-RAS 5.0.7.

Descripción

El agua que fluye por el cauce de los ríos transporta cierta cantidad de sedimentos, afectando las grandes estructuras que funcionan como reservorios de agua, en donde estos sedimentos se acumulan y reducen su capacidad de almacenamiento impactando su nivel de operación. Actualmente en Colombia existe la necesidad de evaluar el fenómeno de sedimentación en embalses. Debido a que en el mercado existen varios modelos de simulación que permiten evaluar el transporte de sedimentos en ríos, nace la necesidad de referenciar y seleccionar el más adecuado para dicho propósito. Por ello, en este trabajo de investigación se realizó una revisión bibliográfica del estado del arte y el proceso de selección de la herramienta computacional (modelo) para la simulación del transporte de sedimentos en el río Tona, para la realización de este trabajo de investigación se utilizó el método de jerarquías analíticas AHP, con el propósito de evaluar los siguientes criterios: Ingreso de datos, interfaz, tiempo de ejecución, aplicabilidad, calibración, resultados e interacción. Se realizó la matriz de apareamiento entre los criterios mencionados anteriormente. Como resultado se selecciona el modelo HEC-RAS 5.0.7 al presentar la calificación más alta. Por último, se simuló el transporte de sedimentos en el río Tona con datos facilitados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) y el manual de HEC-RAS 5.0.7.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andres Almeyda Ortiz, Magister en Ingeniería Civil

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGY FOR THE SIMULATION OF THE TRANSPORTATION OF SEDIMENTS IN THE TONA RIVER*.

AUTHORS : Marlin Johanna Cruz Uribe
David Jesús Herrera Ricardo**

KEY WORDS: method, sediments, simulation, HEC-RAS 5.0.7.

Description

The water that flows through the river bed carries a certain amount of sediment, affecting the large structures that function as water reservoirs, where these sediments accumulate and reduce their storage capacity impacting their level of operation. Currently in Colombia there is a need to evaluate the phenomenon of sedimentation in reservoirs. Because there are several simulation models on the market that allow the evaluation of sediment transport in rivers, the need to reference and select the most suitable one for this purpose is born. Therefore, in this research work a bibliographic review of the state of the art and the selection process of the computational tool (model) for the simulation of sediment transport in the Tona river was carried out, for the realization of this research work used the AHP Analytical Hierarchy Method, with the purpose of evaluating the following criteria: Data entry, interface, execution time, applicability, calibration, results and interaction. The mating matrix was performed between the criteria mentioned above. As a result, the HEC-RAS 5.0.7 model is selected when presenting the highest rating. Finally, the transport of sediments in the Tona river was simulated with data provided by the Bucaramanga Metropolitan Aqueduct (AMB) and the HEC-RAS 5.0.7 manual.

* Degree work

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andres Almeyda Ortiz, Magister en Ingeniería Civil

INTRODUCCIÓN

La actividad del hombre y los procesos naturales aceleran los fenómenos erosivos de las cuencas hidrográficas, aportando flujos de sedimentos que se depositan y transportan en los ríos. Las estructuras que funcionan como reservorios de agua, reciben los sedimentos y estos se acumulan en el lecho afectando su operación. La evaluación del comportamiento del transporte de sedimentos en las cuencas hidrográficas brinda información necesaria para el diseño y operación de embalses. Actualmente en Colombia existe la necesidad de evaluar el fenómeno de sedimentación en embalses¹

El embalse de Bucaramanga está ubicado a 12 Km del casco urbano de la ciudad de Bucaramanga a 600 metros aguas arriba de la confluencia de los ríos Tona y Suratá. El embalse se surte del río Tona que nace entre los páramos de Pescadero y Santurbán y aportó en el 2018 el 41,4% del volumen entregado a la red de distribución de agua potable suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga²

Por lo que representa para Bucaramanga, el río Tona ha sido objeto de estudios, como la determinación de la producción de sedimentos para tres escenarios de cobertura vegetal ³

Caso Base: En el estado inicial del estudio se determinó que la producción de volumen anual de sedimento es de 117.178.795 Ton/año.

¹ Y. Velandia, "Análisis comparativo de metodologías para la predicción de acomodación de los sedimentos gruesos en embalses colombianos," Universidad Nacional de Colombia, 2016.

² AMB, "Informe de gestión 2018," [Online]. Available: <http://www.amb.com.co>. [Accessed: 16-October-2019]

³ A. Gutiérrez, and M. Granados, "Valoración de impactos y evaluación económica en rehabilitación de cuencas, caso cuenca río Tona," Avances En Recursos Hidráulicos, vol. 15, pp. 3-10, 2007

Caso 2: En este caso se consideró el reemplazo de todas las coberturas no naturales de la cuenca con bosque plantado, es decir, una reforestación total, obteniendo una producción anual de sedimento de 94.432.995 Ton/año.

Caso 3: Este último caso contemplado evalúa un reemplazo de las coberturas no naturales de áreas seleccionadas correspondientes al 34% del área total, la cantidad de sedimento producido fue de 113.343.733 Ton/año.

La cuenca de río Sucio que es afluente del río Tona, se caracterizó realizando campañas de campo obteniendo datos de la geología, geomorfología, tipo y cobertura vegetal. La información recopilada se aplicó en dos modelos hidrológicos, el modelo semidistribuido NAM, y el modelo distribuido SHIA. La calibración de los modelos se realizó utilizando datos obtenidos de la estación Carrizal ubicada en el río Tona, obteniendo un buen comportamiento en los caudales promedios, y una subestimación en el caudal máximo⁴

Se considera que el estudio y análisis de sedimentos es un criterio importante para identificar las condiciones de respuesta de las cuencas y los sistemas hídricos a los procesos de transformación por las actividades humanas. Existen relaciones entre las actividades humanas y su impacto sobre la generación de sedimentos, especialmente en las áreas consideradas de potencial producción de sedimentos que poseen información hidrométrica. Es importante considerar el impacto que tienen los procesos de colmatación de sedimentos en las grandes infraestructuras fluviales como presas ⁵

⁴ J. Guzmán, S. Gómez, and E. Niño, "Modelos hidrológicos en la cuenca experimental del río sucio, municipio de Tona, Santander," *Revista de la facultad de ingenierías físico mecánicas*, vol. 7, no. 1, pp. 23-39, 2018.

⁵ IDEAM, "Estudio nacional del agua," [Online].

Available:http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf. [Accessed: 16-October-2019]

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La actividad del hombre y los procesos naturales aceleran los fenómenos erosivos de las cuencas hidrográficas, aportando flujos de sedimentos por depositación y transporte a los ríos. (ENA, 2014). El agua que fluye por el cauce de los ríos transporta los sedimentos, afectando las estructuras que funcionan como reservorios de agua, en donde estos sedimentos se acumulan y afectan su operación.

Se propone determinar teóricamente los sedimento producidos y transportados por la cuenca del rio Tona, mediante el uso de programas, y análisis de escenarios de arrastre de sedimentos, considerando los procesos de erosión, transporte y sedimentación que ocurren debido al cauce del río, y a la actividad humana en la zona.

Actualmente en Colombia existe la necesidad de evaluar el fenómeno de sedimentación en embalses (Velandia, 2016). La importancia del río Tona como medio de transporte de sedimentos hacia la represa de Bucaramanga, es un factor que impacta su vida útil al aportar material que se acumula en la base de la represa disminuyendo el volumen de agua que se puede almacenar. Por lo que representa para Bucaramanga, el río Tona ha sido objeto de estudios como los referenciados en el Anexo 1. Según el Departamento de Ambiente Británico, 2001, la vida operacional de los reservorios de agua está normalmente determinada por la acumulación de sedimentos, debido a que se alcanza un punto en el que el rendimiento del embalse se reduce por debajo de los requerimientos de suministro. Granados & Gutiérrez determinaron la producción de sedimentos en el río Tona en 2007, se utilizó el programa SWAT (SOil and Water Assesment Tool) y la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE; Universal Soil Loss Equation), la cual considera la erosividad (Capacidad de la lluvia de producir erosión) y la erodabilidad

(Susceptibilidad del suelo a ser erosionado). Los resultados obtenidos revelan el volumen anual de erosión producido en la cuenca para tres escenarios de cobertura vegetal evaluados, actualmente existen herramientas computacionales diseñadas para evaluar el comportamiento del transporte de estos sedimentos como los descritos en el Anexo 2.

El estudio del comportamiento del transporte de sedimentos por el río Tona hacia el embalse de Bucaramanga, pretende aplicar modelos computacionales modernos para brindar información de vital importancia para realizar seguimiento, y evaluar posibles alternativas que permitan mitigar su impacto negativo.**3.**

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer mediante la revisión del estado del arte, la metodología más adecuada para ser usada en el estudio del comportamiento del transporte de sedimentos en la cuenca del río Tona.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión del estado del arte mediante la consulta de bases de datos disponibles para la Universidad Industrial de Santander.
- Seleccionar el programa (Software) más adecuado para ser usado en la cuenca del río Tona
- Identificar los parámetros necesarios para la configuración del programa (Software) seleccionado.

3. MARCO DE REFERENCIA

Se realizó la revisión del estado del arte sobre la selección y uso de programas que modelan el transporte de sedimentos. La búsqueda bibliográfica abarcó los repositorios de tesis de grado para pregrado y posgrado en universidades de Colombia, encontrando principalmente en la Universidad Industrial de Santander (UIS), Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) y Universidad Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (UCIJG). La revisión internacional incluyó el catálogo bibliográfico físico y bases de datos electrónicas a los cuales posee suscripción la Universidad Industrial de Santander, tales como lo son ScienceDirect, Springer, Taylor & Francis, DIGITALIA y E-LIBRO.

En la UIS se reporta el uso de modelos en la simulación de cuencas⁶, en donde se utilizó el modelo HEC-RAS en la modelación de canales abiertos, desarrollando una metodología para ser aplicada en este tipo de problemas. En⁷ se describe la elaboración de un modelo hidráulico bidimensional en HEC-RAS para el río de Oro que cubre aproximadamente 26 km. En⁸ simularon en HEC-RAS el comportamiento hidrológico de la cuenca de la Quebrada Miracielo ubicada en el corregimiento de Bábega en Norte de Santander, estimando los caudales para varios periodos de retorno, hallando posibles afectaciones por inundación en la población. En⁹ se determina la distribución de sedimentos en el embalse de Bucaramanga y se desarrolló una guía para su uso. En¹⁰ evalúan el uso del software HEC-RAS en la

⁶ V. Salas, "Práctica empresarial como auxiliar de ingeniería en la empresa IBG Ingeniería E.U aplicando el software HEC-RAS 5.0.3," Universidad Industrial de Santander, 2019

⁷ A. Silva, "Pasantía de investigación en el grupo de investigación geomática, con el fin de apoyar el desarrollo de un modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS; zona de estudio Río de Oro (Nuevo Girón-Café Madrid) y Río Frio (PTAR-Girón)," Universidad Industrial de Santander, 2019.

⁸ M. Albarracín, and C. Kopp, "Análisis de los eventos de inundación en varios periodos de retorno para la cuenca de la Quebrada Miracielo, corregimiento de Bábega (Norte de Santander) a partir de simulación por HEC-RAS (Tesis de pregrado)," Universidad Industrial de Santander, 2018.

⁹ J. Sierra, "Metodología para la simulación de la distribución de sedimentos, en el embalse de Bucaramanga, a través del software "HEC RAS" (Tesis de pregrado)," Universidad Industrial de Santander, 2018.

¹⁰ J. Castañeda, and P. Rivera, "Aplicación de HEC-RAS 5.0 para la modelación de una zona susceptible de inundaciones en el área metropolitana de Bucaramanga," Universidad Industrial de Santander, 2017.

modelación de la posible afectación del proyecto de regulación del río Tona. En ¹¹ realizaron un análisis hidráulico en HEC-RAS de la cuenca de la quebrada las Flores ubicada en el municipio de Vélez, Santander, determinando una afectación en el casco urbano ubicado al interior de la cuenca. En¹² calibraron el modelo SWAT para un periodo de 180 días obteniendo un factor de calibración de $R^2 = 0.73$, y realizando simulaciones en franjas de tiempo de 562 días. En¹³ se aplicó el modelo SWAT en la evaluación de metodologías de calibración del modelo aplicados a la cuenca del río Suratá. En¹⁴ en su tesis de pregrado en la UIS, aplicaron el modelo SWAT en la cuenca superior del río de Oro en Piedecuesta, Colombia, para valorar el servicio ecosistémico de aprovechamiento de agua.

En la UNAL se reporta el uso de modelos para la simulación de cuencas¹⁵ en la calibración de los modelos HEC-RAS y AMQQ para la simulación de la demanda béntica en el río Bogotá. En ¹⁶ se presenta la evaluación de metodologías para el cálculo de la socavación general aplicados al río Medellín, comparándola con los resultados de modelos hidrodinámicos como el HEC-RAS y SRH-1D, encontrando que la ecuación de transporte de sedimentos Ackers & White es la que mejor reproduce el fenómeno de socavación en este río. En¹⁷ se comparó los modelos HEC-RAS, CCHE2D, GSTARS y BRI-STAR evaluando sus capacidades en la simulación del flujo y socavación en un cauce aluvial del río Negro, encontrando que los modelos HEC-RAS y G-STAR son los modelos con mejores resultados en la simulación de variables hidráulicas y sedimentológicas. En ¹⁸ se utilizaron los

¹¹ M. Jaimes, and S. Solano, "Análisis de inundación para la cuenca de la quebrada las flores en el municipio de Vélez, Santander a partir de herramientas SIG y modelado en HEC-RAS," Universidad Industrial de Santander, 2017

¹² D. Pinilla, and M. Peñaloza, "Aplicación del modelo SWAT en la parte superior del río de Oro, parte alta," Universidad Industrial de Santander, 2017.

¹³ A. Molano, "Estudio de las metodologías de calibración para la aplicación del modelo soil and wáter assessment tool (SWAT) en la cuenca del río suratá," Universidad Industrial de Santander, 2016.

¹⁴ J. Duarte, and C. Hernández, "Estudio exploratorio de la valorización del servicio ecosistémico de aprovisionamiento, con énfasis en la cantidad de agua, mediante la aplicación del modelo SWAT," Universidad Industrial de Santander, 2016.

¹⁵ S. Mateus, "Determinación de la influencia de los factores hidrodinámicos y de calidad del agua en la demanda béntica," Universidad Nacional de Colombia, 2011.

¹⁶ G. Barbosa, "Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de grava)," Universidad Nacional de Colombia, 2013.

¹⁷ C. Múnera, "Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, CCHE2D, G-STAR y BRI-STAR, para la modelación hidráulico- morfológica de un cauce aluvial. Aplicación al río negro (Antioquia)," Universidad Nacional de Colombia, 2013.

¹⁸ A. Tavera, "Estudio de la dinámica de sedimentos asociada al impacto de la explotación minera sobre cauces de ríos andinos (Tesis de maestría)," Universidad Nacional de Colombia, 2015.

modelos TETIS y SWAT para determinar el impacto en los sedimentos del río Risaralda debido a la actividad minera, reportando mejores resultados con el modelo TETIS. En ¹⁹ se utilizaron los modelos HEC-RAS y FLO-2D en la simulación de flujos hiperconcentrados de dos eventos con información de campo ocurridos en Colombia. En²⁰ se utilizaron los modelos HEC-RAS y IBER en la zonificación de inundaciones para los casos de estudio del río Cauca (Caucasia, Antioquia) y río Magdalena (Plato, Magdalena). En²¹ se utilizó el modelo HEC-RAS en la evaluación del crecimiento urbano en el escurrimiento superficial y el sistema de drenaje.

En la UPB se reporta el uso del modelo SWAT por parte de²² para determinar la producción hídrica de la cuenca río Tona mediante la calibración y validación del modelo, y la predicción en diferentes escenarios de uso de suelo y climatológicos. En ²³ utilizaron HEC-RAS en la modelación hidráulica y de transporte de sedimentos para evaluar la vida útil del embalse de Bucaramanga, evaluando escenarios presentes y futuros de caudal y sedimentos.

En la Tabla 1 se consolidan los hallazgos de la búsqueda del uso de modelos para casos de estudios hidrológicos y de transporte de sedimentos en Colombia, se observa que los modelos más referenciados son el HEC-RAS, y el SWAT.

Tabla 1. Referencia de modelos utilizados en tesis de universidades colombianas

Referencia	HEC-RAS	SWAT	Otros
Aplicando transporte de sedimentos			
Munera, C. 2013, UNAL	X		CCHE2D, GSTARS BRI-STAR

¹⁹ V. Niño, "Comparación de criterios de engrosamiento del flujo para la simulación de avalanchas en casos Colombianos de estudio," Universidad Nacional de Colombia, 2015.

²⁰ J. Parra, "Análisis de la incertidumbre en la estimación de las zonas inundables con descriptores geomorfométricos derivados de MDE y modelos hidrodinámicos," Universidad Nacional de Colombia, 2017.

²¹ H. Saavedra, "Evaluación del impacto del crecimiento urbano en la escorrenría superficial y en el sistema de drenaje del municipio de Palmira. Caso de estudio: Zanjón Zamorano," Universidad Nacional de Colombia, 2017.

²² G. Carrillo, "Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT," Universidad Pontificia Bolivariana, 2018.

²³ C. Adarme, y J. Ramírez, "Estimación de la sedimentación en un embalse usando el modelo hidráulico HEC-RAS," Universidad Pontificia Bolivariana, 2018

Barbosa S. 2013, UNAL	X		SRH-1D
Tavera, A. 2015, UNAL		X	TETIS
Ardila, E, 2015, ECIJG	X		CCHE-2D
Niño, V. 2015, UNAL	X		FLO-2D
Parra J. 2017, UNAL	X		IBER
Saavedra H. 2017, UNAL	X		
Sierra J. 2018, UIS	X		
Adarme C. y Ramírez J. (2018) UPB	X		
Aplicados otros estudios			
Mateus S. 2011 UNAL	X		AMQQ
Molano A. (2016) UIS	X	X	
Duarte J. y Hernández C. (2016) UIS		X	
Castañeda J. y Riviera P. (2017) UIS	X		
Jaimés M y Solano S (2017) UIS	X		
Albarracín M. y Kopp C. (2018) UIS	X		
Salas S. 2019 UIS	X		
Silva A. (2019) UIS	X		

En la búsqueda bibliográfica internacional en las bases de datos de la UIS, se evidenció que el estudio del comportamiento en el transporte de sedimentos en cuencas hídricas ha generado en el transcurso de décadas la creación de numerosos tipos de modelos, cada uno de ellos posee sus respectivas consideraciones en el modo de abordar el problema de simulación, por lo tanto, algunos modelos requieren y reportan más información que otros. En la literatura se reportan revisiones al creciente número de modelos emergentes, en ²⁴ se presenta las cualidades de modelos que hasta esa fecha brindan la evaluación del transporte de sedimentos. Se considera útil para realizar la selección del modelo agruparlos en los siguientes tipos ^{25,26}

1. Modelos Paramétricos
2. Modelos Conceptuales
3. Modelos Físicos

3.1 MODELOS PARAMÉTRICOS

²⁴ W. Merritt, R. Letcher, and A. Jakeman, "A review of erosion and sediment transport models," *Environmental Modelling & Software*, vol.18, pp. 761-799, 2003.

²⁵] M. Hajigholizadeh, A. Melesse, y H. Fuentes, "Erosion and sediment transport modelling in shallow Waters: a review on approaches, models and applications." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, pp. 1-24, 2018.

²⁶ G. Devi, B. Ganasri, and G. Dwarakish, "A review on hydrological models." *Aquatic Procedia*, vol. 4, pp. 1001-1007, 2015.

Los modelos paramétricos son aquellos que se obtienen de forma empírica, para su desarrollo se requiere de abundantes mediciones en campo, que luego son correlacionados con un conjunto de parámetros, los cuales son diseñados para describir los fenómenos que se considera afecta el proceso que se desea simular. El uso de estos modelos se restringe a condiciones que se asemejen a las mediciones originales ²⁷

En el anexo 1 se muestra un ejemplo del funcionamiento de los modelos paramétricos.

3.2 MODELO CONCEPTUALES

Los modelos conceptuales poseen parámetros que se obtienen mediante la calibración con información experimental, como mediciones de flujos y concentraciones, por lo tanto, algunos parámetros se obtienen de datos experimentales, y otros mediante calibración pues no pueden ser asociados a un significado físico. Se requiere gran cantidad de datos hidrológicos y meteorológicos ²⁸

3.3 MODELOS FÍSICOS

Los modelos creados a partir de bases físicas se caracterizan por utilizar ecuaciones que incorporan parámetros con un significado físico que puede ser medido experimentalmente, como por ejemplo la granulometría del suelo, esto permite que se requieran menos datos para validar el modelo, adicionalmente permiten evaluar

²⁷ M. Hajigholizadeh, A. Melesse, y H. Occit

²⁸ W. Merritt, R. Letcher, and A. Jakeman, M. Hajigholizadeh, A. Melesse, y H. Fuentes, G. Devi, B. Ganasri, and G. Dwarakish, J. Arnold, P. Allen, and G. Bernhardt, K. Beven, y M. Kirkby, R. Johanson, J. Imhoff, and H. Davis, V. Krysanova, D. Müller-Wohlfeil, y A. Becker, R. McCown, G. Hammer, J. Hargreaves, D. Holzworth, and D. Freebairn, M. Simons, G. Podger, and R. Cooke, USEPA. J. Williams, C. Jones, y P. Dyke, R. Young, C. Onstad, D. Bosch, and W. Anderson. Occit

escenarios que no incluye la validación, como los debido a cambios en las actividades humanas que afectan la calidad de agua de la cuenca simulada ²⁹

La literatura relacionada con el modelamiento del transporte de sedimentos reporta en las últimas décadas gran variedad de modelos. Cada modelo es una representación simplificada de la realidad, que con el avance en la capacidad de cómputo permite aumentar su complejidad ³⁰

²⁹ [25] M. Hajigholizadeh, A. Melesse, y H. Fuentes, G. Devi, B. Ganasri, and G. Dwarakish, M. Abbott, J. Bathurst, J. Cunge, P. O'Connell, y Rasmussen, J. D. Borah, M. Bera, S. Shaw, y L. Keefer. Occit

³⁰ Ibid

4. METODOLOGÍA

La selección del modelo para el tema de estudio en este artículo tuvo tres fases: i) identificación de los diferentes tipos de modelos a través de la revisión en la literatura, ii) Aplicando el método de jerarquías analíticas (AHP) se logra la selección del modelo, y iii) se presenta una guía de manejo del modelo hidráulico de forma acorde al transporte de sedimentos teniendo en cuenta que este también se usa en la distribución.

4.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA.

- ScienceDirect de la editorial ELSEVIER que cuenta con 16M de artículos y 39K libros.
- Springer que cuenta con 7M de artículos y 4M de capítulos.
- Taylor & Francis con 4M de artículos
- Digitalia con 30K documentos
- Repositorios de las universidades UIS, UNAL, UPB, UdeA, ECIJG

La búsqueda se filtró por los siguientes términos

- Sediment transport modeling
- Selection sediment transport model
- Nombres de cada uno de modelos como HEC-RAS. SWAT, TOPMODEL, etc...

Como resultado de la búsqueda se seleccionaron 44 documentos con origen en 10 países diferentes (Tabla 2), que contenían información relevante para el logro de los objetivos.

Tabla 2. Cantidad de artículos por país de origen de la publicación

País	Referencias	% de Participación
Colombia	25	56,8
USA	9	20,5
Inglaterra	2	4,5
Australia	2	4,5
Canadá	1	2,3
India	1	2,3
Alemania	1	2,3
Holanda	1	2,3
Sudan	1	2,3
China	1	2,3
Total	44	100

4.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE JERARQUÍAS ANALÍTICAS (AHP).

Para la simulación del transporte de sedimentos en la cuenca del río Tona se planteó el desarrollo del método de jerarquías analíticas (AHP) que permite seleccionar el modelo de acuerdo a su relevancia. En el método seleccionado se identifican los criterios requeridos para su configuración y se definen valores que según datos reportados en la literatura³¹.³²

4.3 GUÍA DEL MANEJO DEL PROGRAMA HEC-RAS 5.0.7.

Luego de seleccionar el modelo HEC-RAS, teniendo la información suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) y el Manual de HEC-RAS 5.0.7. Ingresando los parámetros requeridos por el programa: Secciones transversales, Coeficiente de rugosidad de Manning, Granulometría e Hidrología. Por último se da inicio a la simulación del transporte de sedimentos en el río Tona.

³¹ C. Múnera, "Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, CCHE2D, G-STARS y BRI-STARS, para la modelación hidráulico- morfológica de un cauce aluvial. Aplicación al río negro (Antioquia)," Universidad Nacional de Colombia, 2013.

³² E. Ardila, "Análisis comparativo de la modelación hidráulica entre HEC-RAS y CCHE-2D, aplicado a un cauce aluvial. Caso estudio: río Suarez," Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2015.

5. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN Y CRITERIOS DE SELECCIÓN

5.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Los modelos paramétricos en general se desarrollan para determinar el rendimiento de sedimentos causadas por los diferentes factores que participan en este fenómeno, bien sea por actividad humana o causas naturales. Por lo tanto, estos modelos se descartan porque no permiten simular el transporte de sedimentos.

En la Tabla 3 se muestra la lista de modelos conceptuales evaluados, en donde la mayoría no posee la habilidad de poder determinar el transporte de sedimentos.

Tabla 3. Modelos Conceptuales considerados en la evaluación

Modelos Conceptuales	Referencia	Determina transporte de sedimentos	
		SI	NO
TOPMODEL	Beven, 1979		X
HSPF	Johanson, 1980	X	
EPIC	Williams, 1984		X
AGNPS	Young, 1989		X
SWAT	Arnold, 1993	X	
SWRRB	USEPA, 1994		X
APSIM	McCown, 1996		X
SWIM	Krysanova, 1998		X
IQQM	Simons 1996		X
MEDRUSH	Kirkby, 1999	X	
LASCAM	Viney, 1999		X
AGNPS-UM	Kinnell, 2000		X
EMSS	Vertessy, 2001		X
SEDNET	Prosser, 2001		X
STREAM	Cerdan, 2002		X
SERAE	Le, 2002		X
CAESAR	Coulthard, 2002	X	
WILSIM	Lou, 2007		X
INCA-C	Futter, 2007	X	
PSYCHIC	Davison, 2008		X

En la Tabla 4 se muestra la lista de modelos físicos evaluados, en donde la mayoría posee la habilidad de poder determinar el transporte de sedimentos.

Tabla 4. Modelos Físicos considerados en la evaluación

Modelos físicos	Referencia	Determina transporte de sedimentos	
		SI	NO
ANSWERS	Beasley, 1980		X
CREAMS	Knisel, 2000		X
SPNM	Williams, 1980		X
TOPOG	O'Loughlin, 1986		X
MIKE	Abbott, 1986 Hanley, 1998	X	
WESP	Lopez, 1987	X	
SEM	Storm, 1987	X	
SHESED	Wicks, 1987		X
ARMSED	Riggins, 1989		X
RUNOFF	Borah, 1989		X
KINEROS	Woolhiser, 1990		X
WEPP	Lafien, 1991	X	
PERFECT	Littleboy, 1992		X
OPUS	Smith, 1992		X
GLEAMS	Knisel, 1999		X
PEPP	Schramm, 1994	X	
CSEP	Kirkby, 1995	X	
EROSION-3D	Von Werner, 1995	X	
HEM	Lane, 1995	X	
LISEM	De Roo, 1996		X
SHETRAN	Bathurst, 1996	X	
GUEST	Rose, 1997		X
SIMWE	Mitas, 1998		X
EUROSEM	Morgan, 1998		X
EUROWSE	Torri, 1998		X
EGEM	Woodward, 1999		X
SEMMED	De Jong, 1999		X
CASC2D-SED	Johnson, 2000	X	
WATEM	Van Oost, 2000	X	
PESERA	Kirkby, 2000		X
CHILD	Tucker, 2001		X
MWISED	Torri, 2002		X
KINEROS2	Goodrich, 2002		X
HEC-RAS	Downer, 2004	X	
DWSM	Borah, 1999, 2017	X	
REGEM	Gordon, 2006	X	
SWAT	White, 2011	X	
ACTMO		x	

5.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

El problema de seleccionar el mejor modelo para simular un escenario en particular se puede abordar aplicando el método de jerarquías analíticas (AHP) desarrollado por Thomas L. Saaty en 1997 y refinado en años posteriores³³, el uso de esta metodología se reporta por ³⁴ ³⁵, quienes aplicaron los criterios mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. *Criterios considerados en la evaluación de los modelos HEC-RAS y SWAT*

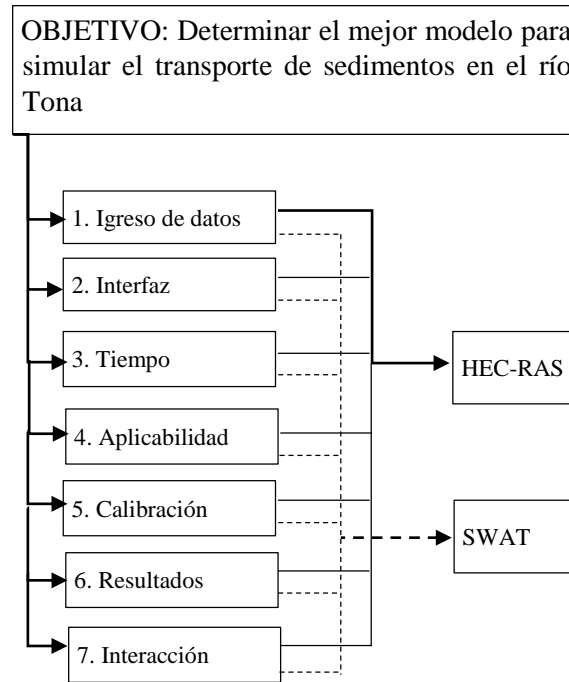
Criterio	Descripción
1.Ingreso de datos	Es la facilidad con la que se permite ingresar la información al programa
2.Interfaz	Evalúa la interacción visual del usuario con el modelo, la cual ayuda a ingresar datos e interpretar resultados
3. Tiempo	Es el tiempo que requiere realizar la simulación
4.Aplicabilidad	Evalúa si el modelo permite simular el escenario de interés
5. Calibración	Evalúa la posibilidad de calibrar el modelo a los datos reales
6. Resultados	Se considera la forma en que se presentan los resultados de la simulación
7.Interacción	Evalúa la interacción del programa con otras herramientas para utilizar la información

³³ T. Saaty, "Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons and central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process," RACSAM, vol. 102 no. 2, pp. 251-318, 2008.

³⁴ E. Ardila, "Análisis comparativo de la modelación hidráulica entre HEC-RAS y CCHE-2D, aplicado a un cauce aluvial. Caso estudio: río Suarez," Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2015.

³⁵ C. Múnera, Occit .

Figura 1. Esquema jerárquico planteado



Los criterios de selección definidos se utilizarán para evaluar los modelos seleccionados que pueden ser utilizados en la solución del problema. En la revisión bibliográfica se logró identificar tres tipos de modelos; paramétricos, conceptuales y físicos. Los modelos de tipo paramétricos se descartan por su carencia en la predicción de resultados a condiciones diferentes a las concebidas por el modelo, ejemplo de su funcionamiento se detalla en el Anexo 1. Basados en la información actual contenida en los documentos de ³⁶, donde se detalla información de Topología del terreno, Hidrología de la cuenca, y granulometría de los sedimentos, es posible utilizar modelos de tipo físicos y conceptuales descritos en las Tablas 4 y 5. De los modelos conceptuales y físicos se identificó que los más referenciados en artículos y tesis son el HEC-RAS y el SWAT. Por lo tanto, el modelo jerárquico planteado se muestra en la Figura 1, en donde se busca seleccionar entre los

³⁶ Ponce de Leon y asociados S.A., "Estudios y diseños fase 2 para el proyecto de regulación embalse de Bucaramanga. Memorando técnico No.3 Hidrología, clima y sedimentos," Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, 2008.

modelos HEC-RAS y SWAT, el mejor modelo para simular el transporte de sedimentos en el río Tona, utilizando los siete criterios de evaluación.

Según la metodología AHP se debe asignar el peso de importancia a cada criterio según la escala de juicios de valores de Saaty (del 1 a 9), los valores numéricos relativos para cada juicio se definieron considerando los publicados por^{37,38} los cuales se muestran en la Tabla 6. Se observa que el criterio más importante al momento de seleccionar el modelo es su aplicabilidad al problema que se desea resolver con un 36,67%, seguido de su capacidad de ser calibrado con un 28,85%, el tercer criterio más importante es la forma como se muestren los resultados con un 12,37%.

Tabla 6. *Pesos relativos para los criterios utilizados en la metodología AHP*

matriz de comparación por pares								
critérios	1	2	3	4	5	6	7	Peso relativo
1	1,00	2,00	2,00	0,14	0,25	0,33	4,00	8,16
2	0,50	1,00	0,50	0,13	0,13	1,00	1,00	4,70
3	0,50	2,00	1,00	0,13	0,20	0,20	2,00	5,41
4	7,00	8,00	8,00	1,00	1,00	4,00	8,00	36,67
5	4,00	8,00	5,00	1,00	1,00	3,00	5,00	28,85
6	3,00	1,00	5,00	0,25	0,29	1,00	3,00	12,37
7	0,25	1,00	0,50	0,13	0,20	0,33	1,00	3,84
suma	16	23	22	3	3	10	24	

Para determinar el peso relativo se procede inicialmente a determinar la matriz normalizada que se muestra en la Tabla 7 a partir de la Tabla 6. Posteriormente para cada fila se calcula el valor promedio resultante en la columna peso relativo. Finalmente, el % peso relativo se obtiene normalizando la columna.

³⁷] E. Ardila. Occit

³⁸ Ponce de Leon y asociados S.A.,. Occit

Tabla 7. Matriz de ponderación de los criterios utilizados en el método AHP.

matriz normalizada									
critorio	1	2	3	4	5	6	7	Peso relativo	% Peso relativo
1	0,062	0,087	0,091	0,050	0,081	0,033	0,167	0,0816	8,1619
2	0,031	0,043	0,023	0,047	0,042	0,101	0,042	0,0470	4,7024
3	0,031	0,087	0,045	0,047	0,065	0,020	0,083	0,0541	5,4101
4	0,431	0,348	0,364	0,360	0,326	0,406	0,333	0,3667	36,6670
5	0,246	0,348	0,227	0,360	0,326	0,304	0,208	0,2885	28,8470
6	0,185	0,043	0,227	0,090	0,094	0,101	0,125	0,1237	12,3740
7	0,015	0,043	0,023	0,047	0,065	0,033	0,042	0,0384	3,8376

Con el planteamiento del problema jerárquico, se procede a evaluar los modelos para cada criterio, asignando un valor en la escala de juicios de valores Saaty, en donde el valor de uno (1) significa que ambos criterios poseen la misma importancia, en el valor de tres (3) se favorece ligeramente al primer criterio, en el valor de cinco (5) favorece fuertemente al primer criterio, en el valor de siete (7) el primer criterio es mucho más importante, y en el valor de nueve (9) no hay duda de la importancia del primer criterio. La asignación de los valores se realizó en base a lo reportado en las publicaciones que aplicaron los modelos evaluados en la solución de problemas para el transporte de sedimentos. Los resultados se muestran en la Tabla 6, en donde se encontró que el modelo HEC-RAS presenta la mejor evaluación en el criterio de calibración.

Los resultados de las evaluaciones de criterios y de los modelos se unifican en la Tabla 8. En donde se determina la evaluación final de cada modelo como la suma del producto entre el peso relativo de cada criterio y el peso relativo de cada modelo.

Tabla 8. Asignación de juicios de valor a los modelos evaluados para cada criterio, método AHP.

1.Ingreso de datos: 8,16%	HEC-RAS	SWAT	matriz normalizada		peso relativo	% peso relativo
	HEC-RAS	1	2	0,67	0,67	0,67
SWAT	0,5	1	0,33	0,33	0,33	33,33
suma	1,5	3				
2.Interfaz: 4,70%	HEC-RAS	SWAT	matriz normalizada		peso relativo	% peso relativo
	HEC-RAS	1	1	0,50	0,50	0,50
SWAT	1	1	0,50	0,50	0,50	50
suma	2	2				
3.Tiempo: 5,41%	HEC-RAS	SWAT	matriz normalizada		peso relativo	% peso relativo
	HEC-RAS	1	1	0,50	0,50	0,50
SWAT	1	1	0,50	0,50	0,50	50
suma	2	2				
4.Aplicabilidad: 36,67%	HEC-RAS	SWAT	matriz normalizada		peso relativo	% peso relativo
	HEC-RAS	1	1	0,50	0,50	0,50
SWAT	1	1	0,50	0,50	0,50	50
suma	2	2				
5.Calibración: 28,85%	HEC-RAS	SWAT	matriz normalizada		peso relativo	% peso relativo
	HEC-RAS	1	3	0,75	0,75	0,75
SWAT	0,33	1	0,75	0,25	0,25	25
suma	1,33	4				
6.Resultados: 12,37%	HEC-RAS	SWAT	matriz normalizada		peso relativo	% peso relativo
	HEC-RAS	1	1	0,50	0,50	0,50
SWAT	1	1	0,50	0,50	0,50	50
suma	2	2				
7.Interacción: 3,84%	HEC-RAS	SWAT	matriz normalizada		peso relativo	% peso relativo
	HEC-RAS	1	5	0,83	0,83	0,83
SWAT	0,2	1	0,17	0,17	0,17	16,67
suma	1,2	6				

Tabla 9. Evaluación AHP de los modelo HEC-RAS y SWAT

Crterios	HEC-RAS	SWAT
8,16	66,67	33,33
4,70	50	50
5,41	50	50
36,67	50	50
28,85	75	25
12,37	50	50
3,84	83,33	16,67
resultados de evaluación	59,9	40,1

Como resultado del método AHP se encuentra que el modelo HEC-RAS posee una calificación del 59,9% con respecto al SWAT del 40,1%. El modelo HEC-RAS cuenta con acceso gratuito, interfaz de usuario amigable, guías de soporte y compilación de errores. Dentro de sus fortalezas y debilidades se resalta su aplicación en la simulación de flujos en canales abiertos, y posibles inestabilidades para flujos con dinámicas altas³⁹. Los resultados de la aplicación del modelo HEC-RAS han sido reportados en publicaciones recientes como:

En ⁴⁰ simularon la variación en el nivel del lecho de la represa Merowe en Sudan. Se utilizó el modelo HEC-RAS 5.0.1 evaluando el efecto de tres ecuaciones para el transporte de sedimentos, y prediciendo los cambios a dos escenarios de precipitaciones.

En⁴¹ se estimó la carga de sedimentos del río Awash hacia el embalse Koka Dam en Etiopía, utilizando de forma acoplada los modelos SWAT y HEC-RAS, en donde el modelo SWAT estima la erosión en la cuenca, y el modelo HEC-RAS estima el transporte de sedimentos en el canal del río hacia el embalse.

³⁹ J. Furze, K. Swing, A. Gupta, R. McClatchey, y D. Reynolds, "Mathematical advances towards sustainable environmental systems," Cham, 2017.

⁴⁰ B. Mohammed, E. Sharfi, and M. Mordos, "Simulation of river bed changes upstream merowe dam," University of Khartoum Engineering Journal, vol. 8, no. 1, pp. 36-43, 2018.

⁴¹ A. Tadesse, and W. Dai, "Prediction of sedimentation in reservoirs by combining catchment based model and stream based model with limited data," International Journal of Sediment Research, vol. 34, pp. 27-37, 2019.

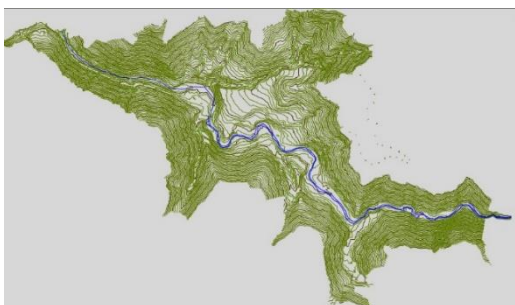
6. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

6.1 TOPOLOGÍA DEL TERRENO

El municipio de Tona está ubicado en la parte alta de la cordillera oriental dentro del departamento de Santander, sus características geográficas se muestran en la⁴², con un clima predominantemente frío es la zona donde nace el río Tona que es alimentado por varias quebradas, principalmente las siguientes: Q. Los Arcos, Q. Río Sucio, Q. Armania y Q. Golondrina.

Se parte de la descripción del terreno en ambiente AutoCAD Civil 3D 2018, de las curvas de nivel de la cuenca del río Tona Figura 2.

Figura 2. *Curvas de nivel en la cuenca del río Tona*



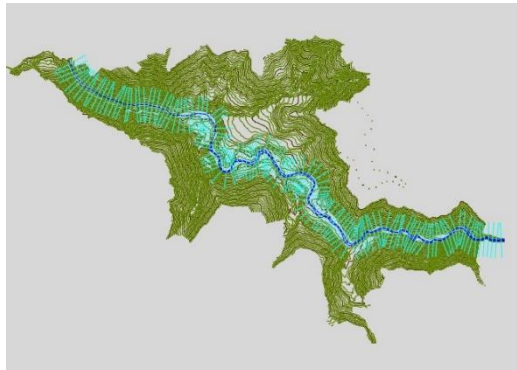
Inicialmente se genera una superficie en AutoCAD Civil 3D 2018 a partir de las curvas de nivel, ingresando en “Prospector/ Surface/ Create Surface”, la superficie se define ingresando a la sección “Prospector/ Surface/ Definition/ Contours/ add...” se seleccionan las curvas de nivel que intervienen en la cuenca del río. La superficie creada se edita al ingresar con clic derecho sobre la superficie al menú “Edit Surface Style...” en la pestaña “Contours”, en la sección “Contour Intervals”, se especifica la

⁴² Ponce de Leon y asociados S.A., Occit

distancia “Minor Interval” de 0.5 m y “Major Interval” de 1 m para crear más curvas de nivel que poblaran las secciones transversales.

En AutoCAD Civil 3D 2018 se crea una poli-línea con la función “PLINE” siguiendo el eje del río. Se asocia un alineamiento a la poli-línea creada ingresando en “Alignmet/ Create Alignment form objects” y seleccionando la poli-línea. Se crean las secciones transversales utilizando la aplicación “Sample Lines”, en la ventana “Create Sample Lines – By Station Range”. El ancho del río en “Right/Left Swath Widht” con un valor de 50m, y la separación entre secciones transversales de 25 metros en “Sampling Increments”, al crear las secciones se debe verificar que las secciones se crucen. Se limita el canal del río con poli-líneas a cada margen del río. Finalmente se obtienen las secciones transversales mostradas en la Figura 3.

Figura 3. *Secciones transversales creadas para ser exportadas a HEC-RAS*

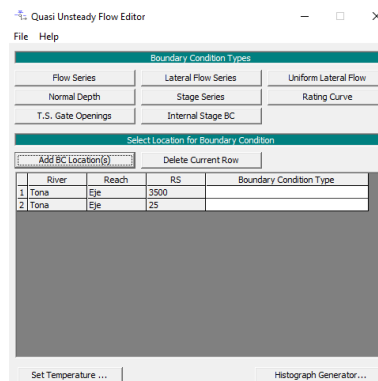


Luego de finalizar la configuración de las secciones transversales en AutoCAD Civil 3D, se procede a exportar la información ingresando en la pestaña “Output”, opción “Export to HEC RAS”, en la ventana desplegada se selecciona la “Surface”, “Site” y “Reach alignment” creados anteriormente, en “River name:” se ingresa el nombre del río “Tona”, se seleccionan los márgenes del río “Left” y “Right” en “Check this to use river Banks”, finalmente con el botón “Export” se exporta el archivo con extensión “.geo” que contiene la información de la topología del terreno en el formato requerido por HEC-RAS.

La descripción del comportamiento hidrológico del río, se especifica luego de ingresar la geometría del terreno. Ingresar al editor de “Quasi Unsteady Flow” desde la ventana principal mediante el ícono, o desde el menú Edit/Quasi Unsteady Flow (Sediment Analysis).

En la ventana del editor de flujos “Quasi Unsteady Flow Editor”, se mostrará automáticamente la cota superior por donde ingresa el caudal, y la cota inferior de desembocadura, para este caso de ejemplo corresponden a los valores de River Stage (RS), RS=3500 y RS=25, respectivamente. Se deben especificar ambas condiciones de frontera (Figura 5).

Figura 5. Ventana Quasi unsteady Flow editor, cota inicial y final



6.2.1 Condición de frontera de la cota superior y flujos laterales. El modelo HEC-RAS 5.0.7 considera que el afluente se compone de un cauce principal, y otros flujos laterales que se le unen. Se debe definir el comportamiento del caudal en el tiempo, tanto para el caudal principal como para los laterales.

El caudal del cauce principal se define en la condición de frontera de la cota superior. La sección del río aguas arriba se muestra automáticamente al momento de ingresar a la ventana del editor de flujo. En este caso de estudio corresponde al RS = 3500 (Figura 4), al seleccionarla, en la parte superior de la ventana se habilita únicamente el botón de condición de frontera de “Flow Series”. El editor “Flow Series for eje” se

muestra con el cual permite ingresar la información de flujo de la corriente en la ventana (Figura 6 y 7).

Figura 6. Condición de frontera “Flow Series” para cota superior

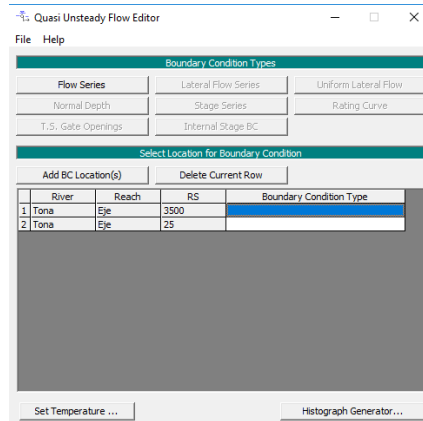
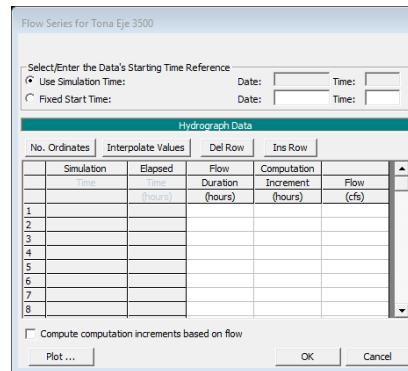


Figura 7. Editor de serie de flujos en cota superior



6.2.2 Configuración de caudales laterales. Los caudales laterales se asocian a las secciones transversales creadas en el archivo de geometría, el flujo de estos caudales puede ingresar en una sección (Lateral Flow Series), o distribuirse a lo largo de varias secciones (Uniform Lateral Flow). Para ingresar un flujo lateral:

En la ventana “Quasi Unsteady Flow Editor” se da click en el botón “Add BC Location(s)”, se muestra la ventana “Select River Station Locations”, en donde se seleccionan las secciones a las cuales se desea asociar el flujo lateral. Por cada sección seleccionada se habilita una nueva condición de frontera. Se debe

seleccionar en cada condición de frontera el tipo de flujo lateral que se desea ingresar. Según los datos suministrados en los informes técnicos se cuenta con el caudal en el puente Tona, ubicado luego de la desembocadura del embalse, para este caso práctico, no se cuenta con información de los caudales laterales, por lo tanto, se considera que el caudal es igual en la cota superior e inferior.

Para ingresar el caudal de cada condición de frontera se recomienda preparar la información previamente en un archivo Excel. La información de hidrología incluye el caudal diario durante el intervalo de tiempo que se desea evaluar, el cual puede cubrir desde días hasta años, para luego ser ingresado al HEC-RAS. En un archivo en Excel se prepara, la fecha inicial de la serie, la cantidad total de datos, y la columna con la serie de flujos en m³/s, esta información se ingresa en la ventana Flow series for... (Figura 8).

Figura 8. Caudales diarios en HEC-RAS

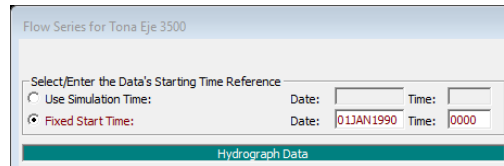
The screenshot shows the 'Flow Series for Tona Eje 3500' dialog box. It has two radio buttons for 'Select/Enter the Data's Starting Time Reference': 'Use Simulation Time' (selected) and 'Fixed Start Time'. The 'Use Simulation Time' option has a date field set to '05JAN1990' and a time field set to '0000'. Below this is a 'Hydrograph Data' table with columns for 'No. Ordinates', 'Interpolate Values', 'Del Row', and 'Ins Row'. The main table has columns for 'Simulation Time', 'Elapsed Time (hours)', 'Flow Duration (hours)', 'Computation Increment (hours)', and 'Flow (m3/s)'. The data rows show a sequence of 24-hour intervals starting from 05ene1990 0000. At the bottom, there is a checkbox 'Compute computation increments based on flow' and buttons for 'Plot ...', 'OK', and 'Cancel'.

No. Ordinates	Interpolate Values	Del Row	Ins Row			
	Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Flow Duration (hours)	Computation Increment (hours)	Flow (m3/s)	
1		05ene1990 0000	24	24	1	0.23
2		06ene1990 0000	48	24	1	0.18
3		07ene1990 0000	72	24	1	0.09
4		08ene1990 0000	96	24	1	0.06
5		09ene1990 0000	120	24	1	0.09
6		10ene1990 0000	144	24	1	0.09
7		11ene1990 0000	168	24	1	0.19
8		12ene1990 0000	192	24	1	0.28
9		13ene1990 0000	216	24	1	0.41
10		14ene1990 0000	240	24	1	0.43
11		15ene1990 0000	264	24	1	0.29
12		16ene1990 0000	288	24	1	0.39
13		17ene1990 0000	312	24	1	0.54
14		18ene1990 0000	336	24	1	0.39
15		19ene1990 0000	360	24	1	0.45
16		20ene1990 0000	384	24	1	0.31

6.2.3 Definir la fecha de inicio. Se permite definir de dos formas la fecha de inicio de la serie de datos. Al seleccionar la opción “Use Simulation Time”, la fecha cambia

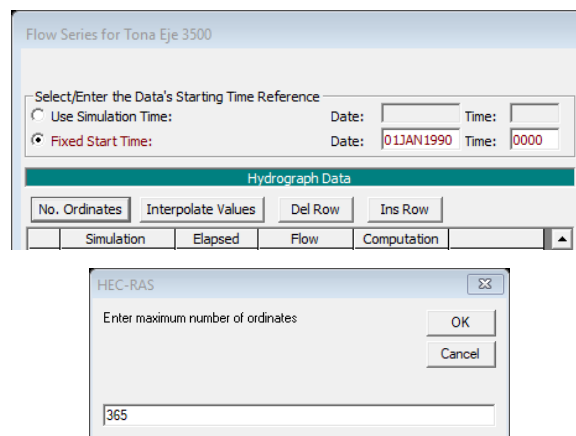
según se indique en el “plan” para inicial la simulación. Al seleccionar “Fixed Start Time” las fechas permanecen constante según se ingresan en la celda “Date:”, la fecha se ingresa en formato DDMMMAAA (el mes se ingresa en inglés), al seleccionar la primera opción, se pueden evitar mensajes de error (Figura 9).

Figura 9. Configuración de la fecha de inicio



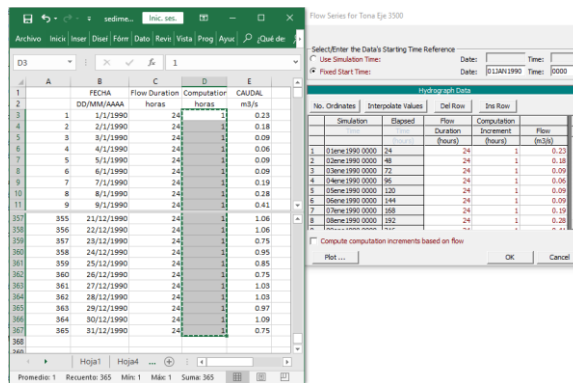
6.2.4 Definir el número de datos. La cantidad de puntos que conforman la serie se especifican en la ventana que se habilita con el botón “No. Ordinates” (Figura 10).

Figura 10. Número de datos hidrológicos



Los datos en Excel se copian y pegan en la columna respectiva de la ventana HEC-RAS (Figura 11).

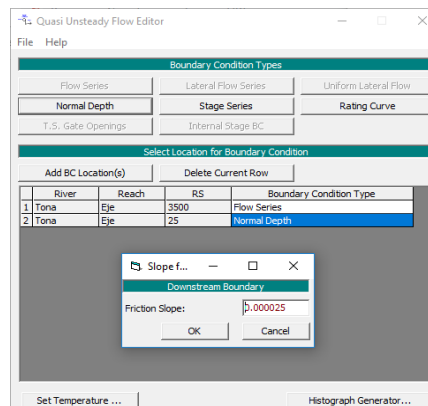
Figura 11. Datos hidrológicos hacia HEC-RAS



6.2.5 Condición de frontera aguas abajo: Se requiere definir la profundidad del cauce del río, para lo cual se pueden utilizar tres condiciones de frontera. En el presente caso se seleccionó la condición de frontera de profundidad normal (Normal Depth) (Figura 12). Las tres condiciones de frontera son:

1. **Stage Time Series:** Esta opción permite ingresar la serie temporal definiendo la profundidad del caudal para cada periodo de tiempo. Se aconseja Esta condición de frontera por ser utilizada normalmente para análisis de datos históricos.
2. **Rating Curve:** Define una relación entre el flujo y la profundidad.
3. **Normal Depth:** Define el factor.

Figura 12. Condición de frontera aguas abajo



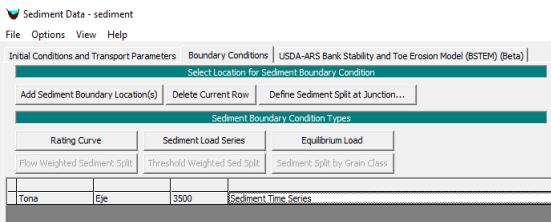
6.3 SEDIMENTOS

Tabla 11. Clasificación del tamaño de partícula en HEC-RAS, mm

Grain Classes		Lower Bound	Upper Bound	Mean Diameter
Clay	Clay	0,002	0,004	0,003
Very Fine Slit	VFM	0,004	0,008	0,006
Fine Slit	FM	0,008	0,016	0,011
Medium Slit	MM	0,016	0,032	0,023
Coarse Slit	CM	0,032	0,0625	0,045
Very Fine Sand	VFS	0,0625	0,125	0,088
Fine Sand	FS	0,125	0,25	0,177
Medium Sand	MS	0,25	0,5	0,354
Course Sand	CS	0,5	1	0,707
Very Course Sand	VCS	1	2	1,41
Very Fine Gravel	VFG	2	4	2,83
Fine Gravel	FG	4	8	5,66
Medium Gravel	MG	8	16	11,3
Coarse Gravel	CG	16	32	22,6
Very Coarse Gravel	VCG	32	64	45,3
Small Cobbles	SC	64	128	90,5
Large Cobbles	LC	128	256	181
Small Bouders	SB	256	512	362
Medium Boulders	MB	512	1024	724
Large Boulders	LB	1024	2048	1448

La carga de sedimentos que ingresa al sistema, se especifica en la pestaña “Boundary Conditions” de la ventana “Sediment Data”. En la configuración de la figura 13 se muestra la sección 3500 por donde ingresa el caudal, para esta condición de frontera se selecciona en la sección “Sediment Boundary Condition Types” la opción de “Sediment Load Series”, accediendo a la ventana “Sediment Load Series”.

Figura 14. Condiciones de frontera para el ingreso de sedimentos al sistema



En la ventana “Sediement Load Series” figura 14, se especifican las secciones “Sediement Serires” y “Gradation Rating Curve”, en la primera se ingresa la variación de carga de sedimentos a lo largo del periodo de tiempo evaluado, según

el estudio realizado por ⁴⁴, al embalse ingresan 131038 toneladas anuales (359 toneladas diarias) de sedimentos, en la sección “Gradation Rating Curve” se puede especificar la variación de la granulometría del sedimento en función del flujo de sedimentos que ingresan al sistema.

Figura 15. Caracterización de los sedimentos que ingresan al sistema

No. Ordinates	Interpolate Values	Report Out	Del Row	Ins Row	Number of Row Road points	Stretts
Simulation Time	Elapsed Time	Duration	Sediment Load	Gradation Rating Curve		
1 01/01/2000 2400 24 24 359				Total Load (tonnes/day)	1	500
2 02/01/2000 2400 24 24 359				Clay (0.002-0.004)		
3 03/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.004-0.008)		
4 04/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.008-0.016)		
5 05/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.016-0.032)		
6 06/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.032-0.0625)		
7 07/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.0625-0.125)	0.667	0.667
8 08/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.125-0.25)	3	3
9 09/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.25-0.5)	11.146	11.146
10 10/01/2000 2400 24 24 359				IPM (0.5-1)	6.771	6.771
11 11/01/2000 2400 24 24 359				IPM (1-2)	9.617	9.617
12 12/01/2000 2400 24 24 359				IPM (2-4)	9.467	9.467
13 13/01/2000 2400 24 24 359				IPM (4-8)	12.865	12.865
14 14/01/2000 2400 24 24 359				IPM (8-16)	18.468	18.468
15 15/01/2000 2400 24 24 359				IPM (16-32)	21.388	21.388
16 16/01/2000 2400 24 24 359				IPM (32-64)	6.892	6.892
17 17/01/2000 2400 24 24 359				IPM (64-128)		
18 18/01/2000 2400 24 24 359				IPM (128-256)		
19 19/01/2000 2400 24 24 359				IPM (256-512)		
20 20/01/2000 2400 24 24 359				IPM (512-1024)		
21 21/01/2000 2400 24 24 359				IPM (1024-2048)		

6.4 EJECUTAR CÁLCULOS

Luego de ingresar la totalidad de la información de Geometría de la cuenca, Flujo de caudales históricos y especificaciones de sedimentos, se procede finalmente a ejecutar la simulación del transporte de sedimentos para un intervalo de tiempo especificado. La configuración final del modelo se realiza en la ventana “Sediment Transport Analysis”.

6.4.1 Nombrar el plan de simulación. En la Ventana “Sediment Transport Analysis” se configura el plan que será ejecutado en la simulación del transporte de sedimentos, este plan es guardado con el nombre que se ingresa por el usuario en la sección Short ID.

6.4.2 Seleccionar la geometría de la cuenca. La información del lecho de la cuenca se ingresa según lo descrito en la sección 5.1. En la ventana de configuración del

⁴⁴ Ponce de Leon y asociados S.A., Occit

plan sección “Geometry File” se muestra la lista desplegable que contiene todas las geometrías disponibles ingresadas por el usuario, de esta lista se selecciona la correspondiente a la cuenca en la que se desea realizar la simulación.

6.4.3 Seleccionar los flujos de caudales históricos. La información relacionada con los caudales que se presentan durante el intervalo de tiempo que es objeto de estudio se ingresa según lo descrito en la sección 5.2. En la ventana de configuración del plan, sección “Quasi-Usteady Flow” se muestra la lista desplegable que contiene los perfiles de flujos disponibles ingresados por el usuario, de esta lista se selecciona la correspondiente al intervalo de tiempo en el que se desea realizar la simulación.

6.4.4 Seleccionar la especificación de los sedimentos. La información relacionada con las especificaciones de los sedimentos que son transportados por el río, se ingresan según lo descrito en el capítulo 5.3. En la ventana de configuración del plan, sección “Sediment Data” se muestra la lista desplegable que contiene las configuraciones de sedimentos relacionada a la cuenca que es objeto de estudio, de esta lista se selecciona la configuración de sedimentos que está relacionada con la cuenca.

6.4.5 Intervalo de tiempo. En la Sección “Simulation Time Window”, se indica el intervalo de tiempo en el que se realiza la simulación, esta fecha está relacionada con los flujos especificados en la sección 5.2, de tal modo que el intervalo de tiempo de la simulación no debe ser mayor al intervalo de tiempo que contiene los flujos.

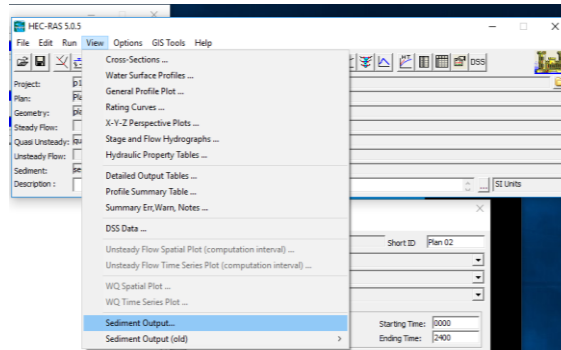
Descripción: En la sección “Plan Description” se ingresa la descripción del modelo.

Ejecutar la simulación: Para iniciar la simulación se oprime el botón “Compute” con el cual se inician los cálculos para realizar la simulación.

6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

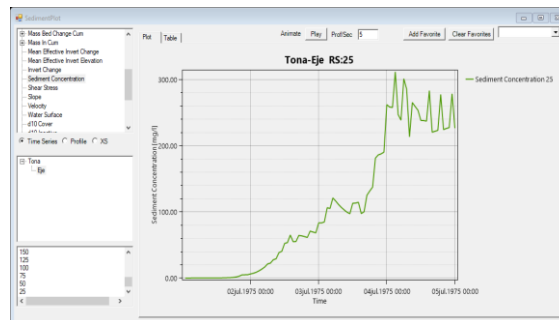
Luego de finalizar la ejecución del programa, se pueden visualizar los resultados ingresando en la sección “Sediment Output”, ubicada en el menú “View” (Figura 14).

Figura 16. Opción de visualización de resultados



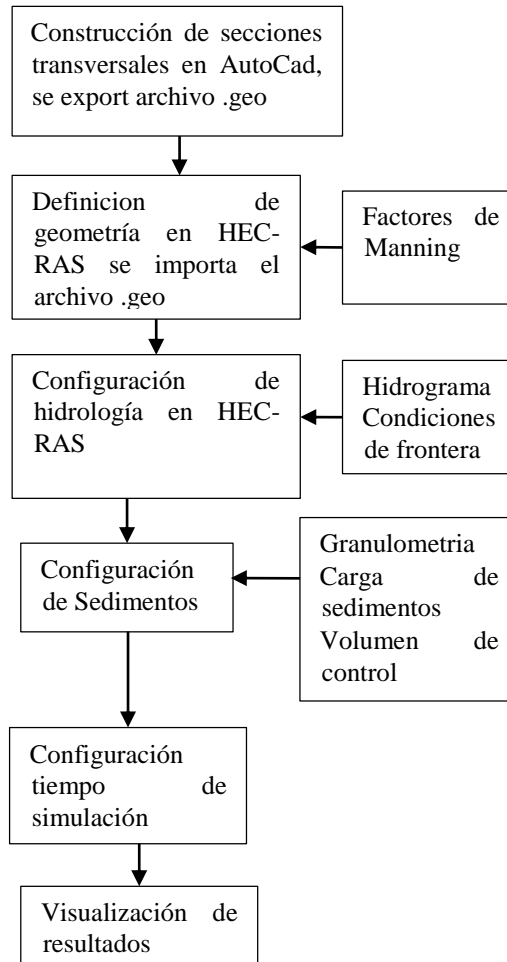
Se mostrará la ventana “Sediment Plot” en la cual se pueden visualizar los resultados en forma de gráficas y tablas de datos (Figura 15).

Figura 17. Visualización de resultados



En la Figura 16 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento para la configuración de los parámetros que se requieren en la simulación del transporte de sedimentos utilizando el modelo HEC-RAS 5.0.7.

Figura 18. Diagrama de flujo para la configuración del modelo HEC-RAS 5.0.7 para la simulación del transporte de sedimentos



7. PARÁMETROS REQUERIDOS POR EL MODELO HEC-RAS

Los parámetros del modelo se definen como todo valor numérico que es ingresado por el usuario, y permanece constante durante los cálculos de simulación. Los parámetros se asocian a características físicas de la cuenca, y permiten caracterizar el caso de estudio, provienen del análisis del planteamiento del problema y de análisis de campo que pueden incluir pruebas experimentales. Se identificaron los siguientes parámetros que se requieren ingresar en el modelo HEC-RAS, para lograr la simulación del transporte de sedimentos en el cauce del río Tona.

Secciones transversales: La topología del cauce del río es descrita mediante segmentos transversales que contienen la altura de los niveles del terreno.

Coeficiente de rugosidad de Manning: En cada una de las secciones transversales en las cuales se dividió el terreno por el cual circula el cauce del río, se debe indicar su respectivo coeficiente de rugosidad de Manning, el cual es utilizado para calcular la velocidad del flujo de agua en dicha sección transversal. El valor numérico del coeficiente depende del terreno que prevalece en la sección. En el proceso de calibración del modelo hidráulico, la variación de los valores de este parámetro permite mejorar la predicción de los modelos. Sin embargo, los valores deben ser consistentes con las tablas reportadas por el manual HEC-RAS, en donde para canales naturales el factor de Manning (n) varía entre 0,025 y 0,150 dependiendo si el terreno posee piedras, vegetación, pendientes y demás factores del terreno. La definición del factor de Manning requiere un trabajo de campo en donde se identifique la descripción del terreno en cada sección transversal definida para la simulación hidráulica del río.

Volumen de control de sedimentos:

Se define al ingresar el grosor y la altura del volumen, y es utilizado para determinar la sección del lecho que puede ser socavada, ocasionando que dependiendo del régimen de flujo, el sedimento pase del lecho al cauce del río, o se deposite en el lecho.

Granulometría: Define el tamaño de partícula del sedimento presente en el lecho de cada sección, también se debe definir la granulometría de los sedimentos que ingresan al sistema por los límites de frontera.

Hidrología: Conformar el conjunto de flujos que describen el comportamiento del cauce en el tiempo de simulación. Este parámetro se debe definir para el cauce principal como para las vertientes al río.

8. CONCLUSIONES

Con el apoyo del método propuesto se llega a la conclusión que el modelo HEC-RAS es el más sobresaliente para ser utilizado en la simulación del transporte de sedimentos del río Tona, cumpliendo con los parámetros necesarios ya que los datos requeridos para su uso son factibles de conseguir, posee accesibilidad gratuita, interfaz amigable para el manejo de la información, compatibilidad con programas complementarios que permiten manipular información, y análisis de datos de forma visual. El modelo cuenta con respaldo de publicaciones validando la calidad de la respuesta.

La simulación del transporte de sedimentos cuenta con un estado del arte en constante crecimiento, aportes teóricos y creación de modelos, sin embargo, el acceso a estos modelos es limitado y son pocos los que cuentan con un soporte constante que permita tener acceso a información de configuración y software ejecutable.

Se identificaron en la literatura referencias a 66 modelos de tipo conceptual y físico, que pueden ser usados para la simulación de modelos hidrológicos, dentro de los cuales 29 pueden ser utilizados para la simulación del transporte de sedimentos.

Se identificó que los modelos más utilizados para ser aplicados en la simulación del transporte de sedimentos son el HEC-RAS y SWAT, de los cuales el HEC-RAS posee las mejores cualidades según el conjunto de criterios evaluados, mediante la metodología de jerarquías analíticas (AHP).

Se detalló la metodología a seguir en la configuración de la información necesaria para la ejecución y convergencia de la simulación. La configuración mostrada se

aplicó con éxito en la simulación con los datos suministrados en la bibliografía consultada.

Se requiere

Definir los datos hidrológicos y aporte de sedimentos en la cota superior y afluentes al río Tona.

Determinar experimentalmente la profundidad y composición del lecho que se considera está formado por sedimentos y puede variar debido a las condiciones hidrológicas del cauce. Esta información se configura como un parámetro de las cotas transversales definidas en la topología del terreno.

BIBLIOGRAFIA

AMB, "Informe de gestión 2018," [Online]. Available: <http://www.amb.com.co>. [Accessed: 16-October-2019]

B. Mohammed, E. Sharfi, and M. Mordos, "Simulation of river bed changes upstream merowe dam," *University of Khartoum Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 36-43, 2018.

C. Adarme, y J. Ramírez, "Estimación de la sedimentación en un embalse usando el modelo hidráulico HEC-RAS," Universidad Pontificia Bolivariana, 2018.

C. Múnera, "Análisis comparativo de los modelos HEC-RAS, CCHE2D, G-STARS y BRI-STARS, para la modelación hidráulico- morfológica de un cauce aluvial. Aplicación al río negro (Antioquia)," Universidad Nacional de Colombia, 2013.

D. Borah, M. Bera, S. Shaw, y L. Keefer, "Dynamic modeling and monitoring of water, sediment, nutrients, and pesticides in agricultural watersheds during storm events," University at Carbondale, 1999.

D. Pinilla, and M. Peñaloza, "Aplicación del modelo SWAT en la parte superior del río de Oro, parte alta," Universidad Industrial de Santander, 2017.

E. Ardila, "Análisis comparativo de la modelación hidráulica entre HEC-RAS y CCHE-2D, aplicado a un cauce aluvial. Caso estudio: río Suarez," Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2015.

G. Barbosa, "Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de grava)," Universidad Nacional de Colombia, 2013.

G. Carrillo, "Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT," Universidad Pontificia Bolivariana, 2018.

G. Devi, B. Ganasri, and G. Dwarakish, "A review on hydrological models." *Aquatic Procedia*, vol. 4, pp. 1001-1007, 2015.

Gutiérrez, and M. Granados, "Valoración de impactos y evaluación económica en rehabilitación de cuencas, caso cuenca río Tona," *Avances En Recursos Hidráulicos*, vol. 15, pp. 3-10, 2007.

H. Saavedra, "Evaluación del impacto del crecimiento urbano en la escorrentía superficial y en el sistema de drenaje del municipio de Palmira. Caso de estudio: Zanjón Zamorano," Universidad Nacional de Colombia, 2017.

IDEAM, "Estudio nacional del agua," [Online]. Available:http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf. [Accessed: 16-Octubre-2019]

J. Arnold, P. Allen, and G. Bernhardt, "Comprehensive Surface - groundwater flow model," *Journal of Hydrology*, vol. 142, pp. 47-69, 1993.

J. Castañeda, and P. Rivera, "Aplicación de HEC-RAS 5.0 para la modelación de una zona susceptible de inundaciones en el área metropolitana de Bucaramanga," Universidad Industrial de Santander, 2017.

J. Duarte, and C. Hernández, "Estudio exploratorio de la valorización del servicio ecosistémico de aprovisionamiento, con énfasis en la cantidad de agua, mediante la aplicación del modelo SWAT," Universidad Industrial de Santander, 2016.

J. Furze, K. Swing, A. Gupta, R. McClatchey, y D. Reynolds, "Mathematical advances towards sustainable environmental systems," Cham, 2017.

J. Guzmán, S. Gómez, and E. Niño, "Modelos hidrológicos en la cuenca experimental del río sucio, municipio de Tona, Santander," *Revista de la facultad de ingenierías físico mecánicas*, vol. 7, no. 1, pp. 23-39, 2018.

J. Parra, "Análisis de la incertidumbre en la estimación de las zonas inundables con descriptores geomorfométricos derivados de MDE y modelos hidrodinámicos," Universidad Nacional de Colombia, 2017.

J. Sierra, "Metodología para la simulación de la distribución de sedimentos, en el embalse de Bucaramanga, a través del software "HEC RAS" (Tesis de pregrado)," Universidad Industrial de Santander, 2018.

J. Williams, C. Jones, y P. Dyke, "The EPIC model and its application," In *International symposium on minimum data sets for agrotechnology transfer*, 19984, pp. 111-121.

K. Beven, y M. Kirkby, "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 43-69, 1979.

M. Abbott, J. Bathurst, J. Cunge, P. O'Connell, y Rasmussen, J. "An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen 'SHE' 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system," *Journal of hydrology*, vol. 87, pp. 45–59, 1986.

M. Albarracín, and C. Kopp, "Análisis de los eventos de inundación en varios periodos de retorno para la cuenca de la Quebrada Miracielo, corregimiento de

Bábega (Norte de Santander) a partir de simulación por HEC-RAS (Tesis de pregrado),” Universidad Industrial de Santander, 2018.

M. Hajigholizadeh, A. Melesse, y H. Fuentes, “Erosion and sediment transport modelling in shallow Waters: a review on approaches, models and applications.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, pp. 1-24, 2018.

M. Jaimes, and S. Solano, “Análisis de inundación para la cuenca de la quebrada las flores en el municipio de Vélez, Santander a partir de herramientas SIG y modelado en HEC-RAS,” Universidad Industrial de Santander, 2017.

M. Simons, G. Podger, and R. Cooke, “IQQM—A hydrologic modelling tool for water resource and salinity management,” *Environ. Softw*, vol. 11, pp. 185–192, 1996.

Molano, “Estudio de las metodologías de calibración para la aplicación del modelo soil and wáter assessment tool (SWAT) en la cuenca del río suratá,” Universidad Industrial de Santander, 2016.

Ponce de Leon y asociados S.A., “Estudios y diseños fase 2 para el proyecto de regulación embalse de Bucaramanga. Memorando técnico No.3 Hidrología, clima y sedimentos,” *Acueducto Metropolitano de Bucaramanga*, 2008.

R. Johanson, J. Imhoff, and H. Davis, “User manual for hydrological simulation program-fortran (HSPF),” *Washington, USA: Enviromental Reserach Laboratory*, 1980.

R. McCown, G. Hammer, J. Hargreaves, D. Holzworth, and D. Freebairn, “APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research,” *Agriculture systems*, vol. 50, pp. 255–271, 1996.

R. Young, C. Onstad, D. Bosch, and W. Anderson, "AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds," *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 44, no. 2, pp. 4522–4561, 1989.

S. Mateus, "Determinación de la influencia de los factores hidrodinámicos y de calidad del agua en la demanda béntica," Universidad Nacional de Colombia, 2011.

Silva, "Pasantía de investigación en el grupo de investigación geomática, con el fin de apoyar el desarrollo de un modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS; zona de estudio Río de Oro (Nuevo Girón-Café Madrid) y Río Frío (PTAR-Girón)," Universidad Industrial de Santander, 2019.

T. Saaty, "Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons and central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process," *RACSAM*, vol. 102 no. 2, pp. 251-318, 2008.

Tadesse, and W. Dai, "Prediction of sedimentation in reservoirs by combining catchment based model and stream based model with limited data," *International Journal of Sediment Research*, vol. 34, pp. 27-37, 2019.

Tavera, "Estudio de la dinámica de sedimentos asociada al impacto de la explotación minera sobre cauces de ríos andinos (Tesis de maestría)," Universidad Nacional de Colombia, 2015.

US Army Corps of Engineers, "HEC-RAS River análisis system: User's Manual," [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation.aspx> [Accessed: 16-October-2019]

USEPA. "SWRRBWQ: Window's Interface User's Guide," *Washington, USA, Environmental Protection Agency*, 1994.

V. Krysanova, D. Müller-Wohlfeil, y A. Becker, "Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds," *Ecol. Model*, vol. 106, pp. 261–289, 1998.

V. Niño, "Comparación de criterios de engrosamiento del flujo para la simulación de avalanchas en casos Colombianos de estudio," *Universidad Nacional de Colombia*, 2015.

V. Salas, "Práctica empresarial como auxiliar de ingeniería en la empresa IBG Ingeniería E.U aplicando el software HEC-RAS 5.0.3," *Universidad Industrial de Santander*, 2019

W. Merritt, R. Letcher, and A. Jakeman, "A review of erosion and sediment transport models," *Environmental Modelling & Software*, vol. 18, pp. 761-799, 2003.

Y. Velandia, "Análisis comparativo de metodologías para la predicción de acomodación de los sedimentos gruesos en embalses colombianos," *Universidad Nacional de Colombia*, 2016.

ANEXOS

ANEXO A. MODELO PARAMÉTRICO PSIAC

El modelo PSIAC (Pacific Southwest INTER-AGENCY COMMITTEE) (PSIAC, 1968), propone correlacionar el rendimiento de sedimentos con el siguiente conjunto de parámetros:

Surface Geology: Representa la geología del terreno, para suelos formados por formaciones de roca dura es cero (0), y aumenta su valor hasta diez (10) para terrenos que presenten rocas fracturadas o arenas.

Soils: Representa el tipo de suelo, los suelos con valores de cero (0) se caracterizan por contener arcillas, alto porcentaje de fragmentos de rocas o alto contenido de materia orgánica, se incrementa su valor hasta diez (10) para suelos con textura fina.

Climate: Representa las precipitaciones que ocurren en el terreno, los climas de valor cero (0) se caracterizan por ser húmedos con baja lluvias, caída de nieve, climas áridos con bajas o ninguna precipitación, el valor de este parámetro alcanza el diez (10) para climas con tormentas.

Runoff: Representa la escorrentía, los terrenos con bajos picos de flujo por unidad de área poseen valor de cero (0), y en donde se presente altos picos de flujo por unidad de área poseen valor de diez (10)

Topography: Representa la topografía del terreno, laderas con pendientes menores al 5% o terrenos planos poseen valor de cero (0), incrementa hasta veinte (20) para terreno escarpado con pendiente superior al 30%.

Ground Cover: Representa la cubierta vegetal, terrenos cubierta por vegetación obtiene valores de menos diez (-10) y aumenta hasta diez (10) cuando la cubierta vegetal no excede el 20%.

Land Use: Representa el uso del suelo, posee valor de menos diez (-10) para suelos no cultivados, y aumenta hasta diez (10) para suelos con más del 50% del área cultivada.

Upland Erosion: Representa la erosión del suelo, terrenos sin aparente erosión adquiere valores de cero (0), aumenta hasta veinticinco (25) para terrenos con arroyos, quebradas o erosión en las laderas.

Channel Erosion and Sediment Transport: Representa el tipo de canales presentes en el terreno, para canales artificiales se asigna un valor de cero (0), y para canales que presentan erosión aumenta su valor hasta veinticinco (25)

$$\textit{Estimated Sediment Yield} = 0,0816 e^{0,0363*(\textit{Sediment Yield Rating Factor})}$$

Donde:

Estimated Sediment Yield: Rendimiento de sedimentos [=] $\frac{\textit{Acre Feet}}{\textit{mile}^2 \textit{ year}}$

Sediment Yield Rating Factor: Sumatoria de los parámetros considerados

El modelo PSIAC ha sido utilizado en la simulación de generación de sedimentos en represas y cuencas en Tanzania (Ndomba, 2013), el modelo se calibro con datos de campo obteniendo un coeficiente de correlación $r=0.85$.